

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

**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**

Marcio Koiti Chiba

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas**

Piracicaba
2005

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Marcio Koiti Chiba
Engenheiro Agrônomo

**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**

Orientador:

Prof. Dra. MARIA EMÍLIA MATTIAZZO-PREZOTTO

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas**

Piracicaba
2005

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

Chiba, Marcio Koiti

Uso de lodo de esgoto na cana-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo:
parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura / Marcio
Koiti Chiba. - - Piracicaba, 2005.
142 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.
Bibliografia.

1. Biossólido 2. Cana-de-açúcar 3. Fertilidade do solo 4. Fósforo 5. Lodo de
esgoto 6. Metal pesado do solo 7. Nitrogênio I. Título

CDD 633.61

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

Aos meus pais: KODI e SHIGEKO
ao meu irmão: RICARDO
que muito me apoiaram na realização deste sonho

Ofereço

À REGIANE SISTO por seu companheirismo,
amor e por fazer minha vida mais bela
Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e saúde.

A Dra Maria Emília Mattiazzo-Prezotto pela orientação, amizade e ensinamentos.

Ao Dr Fernando Oliveira pela amizade e auxílio na elaboração deste projeto.

Ao Sr Arlindo Batagin Jr. pela cessão da área experimental e disponibilização de recursos para a condução e conclusão dos experimentos.

A Dra Raffaella Rossetto da APTA/Pólo Regional Centro-Sul pelo auxílio nas atividades de campo.

A Dra Mônica Ferreira Abreu do Instituto Agronômico de Campinas por seu auxílio nas determinações analíticas.

Aos amigos do Laboratório de Química Analítica/Ambiental: Fernando Limonge, Claudeir de Oliveira, Estevão Vicari Mellis, Cristiano Andrade, Jonas Chiaradia, Marta Velasco-Molina, Gláucia Santos, Letícia Altafin, Lúcia Firme e Adriana Pires pela amizade sincera.

Ao Dr Arnaldo Rodella e Dr Arquimedes Lavorentti pela oportunidade de finalizar as análises químicas no Laboratório de Química Analítica, LCE/USP.

Ao Dr Marcos Y. Kamogawa pelos esclarecimentos e apoio nos momentos de “dúvidas analíticas”.

Aos funcionários do setor de Química do Departamento de Ciências Exatas/ESALQ, em especial para as secretárias: Ana Maria e Angélica pelo pronto atendimento nos momentos de “apuros”.

A Comissão de Pós-Graduação do Curso de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP pela oportunidade concedida.

A CAPES pela bolsa de estudos concedida.

Enfim, a todos que direta e indiretamente colaboraram com este trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*“Se você procurar bem, você
acaba encontrando não a
explicação (duvidosa) da
vida, mas a poesia
(inexplicável) da vida...”*

Carlos Drumond de Andrade

*“Carrego o peso da lua,
Três paixões mal curadas
Um saara de paginas,
Essa infinita madrugada.
Viver de noite
me fez senhor do fogo
A vocês eu deixo o sono.
O sonho, não.
Esse eu mesmo carrego.”*

Paulo Leminsky

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
REFERÊNCIAS	18
2 USO DE LODO DE ESGOTO EM SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE DE NITROGÊNIO: PARÂMETROS DA FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DA PLANTA E RENDIMENTOS DA CULTURA.....	23
Resumo.....	23
Abstract.....	23
2.1 Introdução.....	24
2.2 Desenvolvimento	25
2.2.1 Revisão de Literatura.....	25
2.2.1.1 Aspectos gerais do nitrogênio na agricultura.....	25
2.2.1.2 Transformações do nitrogênio no solo adicionado via lodo de esgoto.....	26
2.2.1.3 Importância do nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar.....	31
2.2.1.4 Lodo de esgoto e disponibilidade de metais pesados no solo.....	33
2.2.2 Material e Métodos.....	36
2.2.2.1 Descrição da área experimental.....	36
2.2.2.2 Lodo de esgoto utilizado.....	38
2.2.2.3 Tratamentos	38
2.2.2.4 Instalação e condução do experimento.....	40
2.2.2.5 Amostragem de solo	42
2.2.2.6 Extração e quantificação de nitrogênio (N-total e N-inorgânico) em solos	42
2.2.2.7 Determinação da CTC	42
2.2.2.8 Extração dos teores totais de Cd Cr, Ni e Pb no solo	42
2.2.2.9 Extração de Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis no solo	43
2.2.2.10 Amostragem e análise do tecido foliar	43
2.2.2.11 Parâmetros tecnológicos do caldo	43

2.2.2.12 Tratamento estatístico dos dados.....	45
2.2.3 Resultados e Discussão.....	45
2.2.3.1 Fertilidade do solo	47
2.2.3.1.1 pH do solo.....	47
2.2.3.1.2 Conteúdo de carbono orgânico do solo	49
2.2.3.1.3 Condutividade elétrica.....	51
2.2.3.1.4 Teores disponíveis de macro e micronutrientes no solo.....	53
2.2.3.1.5 CTC do solo.....	54
2.2.3.1.6 Nitrogênio no solo	56
2.2.3.1.7 Rendimentos da cana-de-açúcar	62
2.2.3.1.8 Macronutrientes na cana.....	69
2.2.3.1.9 Metais pesados na cana	70
2.2.3.1.10 Metais pesados no solo.....	75
2.2.4 Conclusões.....	76
Referências.....	77
3 USO DE LODO DE ESGOTO NA CANA-PLANTA COMO FONTE DE FÓSFORO: FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DA PLANTA E RENDIMENTOS DA CULTURA.	87
Resumo.....	87
Abstract.....	87
3.1 Introdução	88
3.2 Desenvolvimento.....	89
3.2.1 Revisão de Literatura.....	89
3.2.1.1 Importância do fósforo na agricultura	89
3.2.1.2 Lodo de esgoto como fonte de fósforo	91
3.2.1.3 Fracionamento de P em solos tratados com lodo de esgoto	93
3.2.1.4 Importância do fósforo para a cana-de-açúcar.....	95
3.2.2 Material e métodos	96
3.2.2.1 Descrição da área experimental.....	96
3.2.2.2 Tratamentos e delineamento estatístico	98
3.2.2.3 Lodo de esgoto utilizado.....	98
3.2.2.4 Cálculo da dose de lodo de esgoto.....	99

3.2.2.5	Instalação e condução dos experimentos.....	100
3.2.2.6	Amostragem e análise do solo.....	100
3.2.2.7	Extração e quantificação de nitrogênio (N-total e N-inorgânico) em solos.....	101
3.2.2.8	Determinação da CTC.....	101
3.2.2.9	Extração dos teores totais de P e metais pesados (Cd, Cr, Ni e Pb) no solo.....	101
3.2.2.10	Extração de Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis no solo.....	101
3.2.2.11	Fracionamento de fósforo do solo.....	102
3.2.2.12	Parâmetros tecnológicos do caldo.....	102
3.2.2.13	Amostragem e análise foliar.....	103
3.2.2.14	Forma de análise dos resultados.....	103
3.2.3	Resultados e discussão.....	104
3.2.3.1	Alterações nos atributos do solo.....	104
3.2.3.2	Fertilidade do solo.....	105
3.2.3.3	Nitrogênio no solo.....	108
3.2.3.4	Fracionamento das formas de P no solo.....	110
3.2.3.5	Metais pesados no solo.....	112
3.2.3.6	Macronutrientes na cana-de-açúcar.....	113
3.2.3.7	Micronutrientes e metais pesados na cana-de-açúcar.....	115
3.2.3.8	Rendimentos da cana-de-açúcar.....	117
3.2.4	Conclusões.....	119
	Referências.....	119
	APÊNDICES.....	128
	ANEXOS.....	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais processos de transformação, no solo, do nitrogênio orgânico contido em lodo de esgoto.....	27
Figura 2 - Precipitação pluviométrica, água disponível (AD = precipitação – evapotranspiração), temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) registradas em Capivari (SP) durante o período de Outubro de 2002 a Outubro de 2004	37
Figura 3 - Visão parcial de uma parcela experimental (A), aplicação do LE (B, C) e incorporação (D, E, F). Pesagem dos colmos na colheita do experimento (G).....	41
Figura 4 - Efeito dos tratamentos nos valores de pH do solo PVD, camada de 0-0,2 m, ano agrícola 2003/04.	48
Figura 5 - Carbono orgânico na camada de 0-0,2 m nos anos agrícolas de 2002/03 e 2003/04. T1 = Controle; T2 = AM; T3 = LE+0N _{ISA} ; T4 = LE+0N _{IS60A} ; T5 = LE+60N _{ISA} ; T6 = LE+60N _{IS60A} ; T7 = LE+120N _{ISA} ; T8 = LE +120N _{IS60A}	50
Figura 6 - Condutividade elétrica do solo.	52
Figura 7 - Efeitos dos tratamentos no conteúdo de nitrogênio total no solo nos anos agrícolas de 2002/03 (A) e 2003/04 (B). T1 = Controle; T2 = AM; T3 = LE+0N _{ISA} ; T4 = LE+0N _{IS60A} ; T5 = LE+60N _{ISA} ; T6 = LE+60N _{IS60A} ; T7 = LE+120N _{ISA} ; T8 = LE +120N _{IS60A}	56
Figura 8 - Efeito de doses de N mineral nos teores de nitrogênio orgânico na camada de 0-0,2 m em 2002/03 (A), efeitos da interação N x I nas camadas de 0-0,2 m (B) e 0,2-0,4 m (C) em 2003/04.....	58
Figura 9 - N-NO ₃ ⁻ (A) e N-NH ₄ ⁺ (B) no solo.	60
Figura 10 – N-inorgânico (N-NH ₄ + N-NO ₃) (A) e relação C:N do solo (B).	61
Figura 11 - Produção de colmos (TCH) em função de doses de N e épocas de incorporação do LE, nas safras 2002/03 (A) e 2003/04 (B).....	63
Figura 12 - Teores foliares de N em função da aplicação de LE + N.	64
Figura 13 - Açúcares redutores no caldo de cana-de-açúcar colhida em 2002/03 (A) e em 2003/04 (B). Porcentagem de fibras (C) e Pol% (D) no caldo em 2003/04.	67
Figura 14 - Açúcar Total Recuperável (ATR) em função de doses de N e épocas de incorporação na segunda safra (2003/04) do experimento com soqueiras.....	68

Figura 15 - Toneladas de açúcar por hectare (TAH) em função da adubação mineral (AM) e da aplicação de LE com e sem N.	69
Figura 16 -Concentração de macronutrientes na folha de cana-de-açúcar em função da adubação mineral (AM) e da aplicação de lodo de esgoto e nitrogênio mineral. Amostragem realizada no período de máximo desenvolvimento vegetativo ($\pm 4,5$ meses).	72
Figura 17 - Concentração de macronutrientes na folha de cana-de-açúcar em função da adubação mineral (AM) e da aplicação de lodo de esgoto e nitrogênio mineral. Amostragem realizada na colheita dos colmos (± 12 meses).....	73
Figura 18 - Concentração de alguns macronutrientes no caldo da cana no anos de 2002/03 (A) e 2003/04 (B).....	74
Figura 19 - Manganês e zinco no caldo de cana-de-açúcar.....	75
Figura 20 - Precipitação pluviométrica, água disponível (AD = precipitação – evapotranspiração), temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) registradas em Capivari (SP) durante o período experimental	97
Figura 21 – Análise de regressão para produção de colmos e de açúcar em função das doses de P aplicadas em associação ao LE.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção anual e vias de disposição de lodo de esgoto	16
Tabela 2 - Valores orientadores de metais pesados para solos do Estado de São Paulo	35
Tabela 3 - Teor total original de alguns metais pesados em diferentes solos.....	35
Tabela 4 - Alguns atributos químicos ¹ e físicos ² do solo	38
Tabela 5 - Alguns atributos dos lodos de esgoto utilizados. Valores com base na matéria seca ..	39
Tabela 6 - Tratamentos do experimento com soqueiras de cana-de-açúcar	39
Tabela 7 - Esquema da análise de variância constituído de fatorial 3 x 2 + 2 fatores adicionais em delineamento em blocos casualizados	45
Tabela 8 - Aporte de alguns nutrientes, carbono orgânico e metais pesados com a aplicação de 14 e 16 t ha ⁻¹ de LE, respectivamente nos anos agrícolas de 2002/03 e 2003/04, num Argissolo Vermelho distrófico cultivado com cana de açúcar (RB855536).....	46
Tabela 9 - Coeficientes de correlação linear entre produção de colmos (TCH), teor foliar de N, teor de N-inorgânico no caldo, teor de N-inorgânico e orgânico no solo nos dois anos agrícolas (2002/03 e 2003/04).....	65
Tabela 10 – Características químicas ¹ e físicas ² do solo na área experimental.....	97
Tabela 11 – Tratamentos	98
Tabela 12 - Atributos do lodo de esgoto utilizado. Valores com base na matéria seca	99
Tabela 13 - Aporte de nutrientes e metais pesados ao solo com a aplicação de 8,2 t ha ⁻¹ de lodo de esgoto (base seca).....	104
Tabela 14 - Atributos químicos do solo em função da aplicação de lodo de esgoto e adubo fosfatado. Valores médios de quatro repetições	105
Tabela 15 - Efeito dos tratamentos na capacidade de troca catiônica do solo.....	107
Tabela 16 - Teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 0-0,2 m. Valores médios de quatro repetições.....	108
Tabela 17 - Teores de nitrogênio e relação C/N do solo. Valores médios de quatro repetições .	109
Tabela 18 – Fracionamento das formas de fósforo presentes no lodo de esgoto. Valores médios de quatro repetições.....	110
Tabela 19 - Fracionamento das formas de P e teores disponíveis extraídos com extrator ácido (P-H ₂ SO ₄) em solo fertilizado com lodo de esgoto e fertilizante fosfatado mineral.....	111
Tabela 20 - Teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo. Valores médios de quatro repetições	112

Tabela 21 - Teores foliares de macronutrientes em duas épocas de amostragem. Valores médios de quatro repetições	114
Tabela 22 - Teores de macronutrientes no caldo de cana-de-açúcar. Valores médios de quatro repetições	114
Tabela 23 - Teores foliares de Cu, Fe, Mn, Zn. Valores médios de quatro repetições	116
Tabela 24 - Teores de Cu, Fe, Mn e Zn no caldo de cana-de-açúcar. Valores médios de quatro repetições	116
Tabela 25 - Efeitos da aplicação de lodo de esgoto com e sem suplementação de fósforo sobre a produção de colmos e rendimentos agro-industriais da cana-de-açúcar	117

RESUMO

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

O uso agrícola é uma interessante alternativa de disposição do lodo de esgoto por representar aportes de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica ao solo. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do lodo de esgoto como fonte de nitrogênio e fósforo para a cultura da cana-de-açúcar (cana-planta e soqueira) e rendimentos da cultura. Para tanto foram conduzidos dois experimentos à campo entre os anos de 2002 a 2004. Em um dos experimentos sob um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, foi cultivada a variedade RB855536 (soqueira de segundo corte), avaliando-se durante dois anos agrícolas (2002/2003 e 2003/2004), a resposta da cultura à aplicação de lodo de esgoto (14 e 16 t ha⁻¹, base seca, respectivamente em 2002/03 e 2003/04) com e sem adubação nitrogenada mineral (nitrato de amônio) em doses equivalentes a 0, 50 e 100% da dose de N recomendada (120 kg ha⁻¹ de N). No outro experimento, foi utilizada a cultivar SP83-2847 (cana-planta cultivada por cerca de 16 meses) num Argissolo Amarelo eutrófico e avaliada a resposta da cultura à aplicação de lodo de esgoto (8,2 t ha⁻¹ em base seca) com e sem superfosfato triplo em doses equivalentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da dose de P₂O₅ recomendada (180 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Os dados obtidos mostram que o lodo de esgoto constituiu-se numa fonte eficiente de N para as soqueiras, não sendo necessária a aplicação adicional de fertilizantes nitrogenados para a obtenção de produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) similares ao do tratamento com adubação mineral convencional. Por outro lado, na cana-planta, foi necessário aplicar, adicionalmente ao lodo de esgoto, 75% da dose de fósforo recomendada para obter rendimentos similares aos da adubação mineral. A aplicação de LE, nas doses calculadas em função do teor de N, tanto nas soqueiras quanto na cana-planta, não causaram efeitos deletérios na qualidade do solo e da matéria prima produzida. Os teores de metais pesados no solo, nas folhas e no caldo da cana não foram alterados com a aplicação do resíduo em comparação à adubação mineral.

Palavras-chave: Biossólido; Resíduo; Nitrogênio; Fósforo; Fertilidade do solo; Metais pesados

ABSTRACT

Use of sewage sludge on soil planted with sugarcane as nitrogen and phosphorus source: soil fertility attributes, plant nutrition and yield

The use of sewage sludge on land can improve soil fertility considering nitrogen, phosphorus and organic matter inputs. The aim of these experiments was to evaluate the effect of sewage sludge on soil, sugarcane plants and sugarcane yield in substitution to nitrogen and phosphorus from mineral fertilizers. The effect of the sewage sludge as a source of nitrogen was evaluated by an experiment carried in an Ultisol (Argissolo Amarelo) planted with the cultivar RB855536 during 2002/03 (first harvesting) and 2003/04 (2nd harvesting). The level of sewage sludge used in this experiment was 14 and 16 t ha⁻¹, dry weigh basis, respectively on the yield 2002/03 and 2003/04. The application of N fertilizer was made, in treatments, after the sludge application, at rates of 0, 50 e 100% of the recommended level to sugarcane plantation (120 kg ha⁻¹ of N). The other experiment, to evaluate the effectiveness of sewage sludge as phosphorus source to cane plants, was carried in an Ultisol (Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico), and the cultivar used was the SP83-2847. The level of sewage sludge applied in all treatment, but control, in this experiment was 8,2 t ha⁻¹, dry weight basis with the mineral-P fertilizer being applied in rates corresponding to 0, 25, 50, 75 e 100% of the total amount recommended to cane plants (180 kg ha⁻¹ of P₂O₅). The data allows to conclude that sewage sludge application can supply the N requirement of sugarcane ratoons. The sewage sludge could only supply 25% of the total P recommendation for cane plants. There was not observed any harmful effects on soil, plants or juice quality due to the sewage sludge applied to soils.

Key words: Biosolid, Waste, Nitrogen, Phosphorus; Soil Fertility, Heavy Metals

1 INTRODUÇÃO

A implantação de mecanismos de desenvolvimento limpos ou auto-sustentáveis vem ganhando força na medida em que a consciência preservacionista atinge maior parte da população economicamente ativa. A degradação dos recursos naturais, em especial do solo e da água, decorre da produção, acúmulo e descarte de resíduos oriundos da atividade humana industrial e domiciliar sem o devido monitoramento técnico com ênfase na preservação ambiental.

Um desses problemas diz respeito ao manejo e tratamento dos esgotos. O saneamento básico é uma premissa para qualquer sociedade que se propõem a atingir um elevado nível de qualidade de vida. Infelizmente, ainda hoje, grande parte das águas servidas é lançada diretamente nos cursos d'água sem receber qualquer tipo de tratamento prévio. A solução de parte do problema, todavia, implica no surgimento de outro, este de duplo caráter: ambiental e de saneamento que é o descarte do lodo de esgoto (LE) gerado ao final do tratamento das águas servidas. Para se ter uma idéia das dimensões do problema, basta citar que somente na região metropolitana de São Paulo, Melo e Marques (2000) estimam que a Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (SABESP) produzirá cerca de 800 t dia⁻¹ de lodo de esgoto, em base seca, no ano de 2015.

A composição química do lodo de esgoto, de um modo geral, varia em função do tipo de esgoto (domiciliar e/ou industrial), de processo gerador do lodo na ETE, de estabilização e de condicionamento final (MELO; MARQUES, 2000; TSUTIYA, 2001). Andrade (2004) reuniu dados de composição de diferentes lodos de esgoto utilizados em vários experimentos no Estado de São Paulo, mostrando a variabilidade de algumas de suas características químicas com base no material seco e cujos valores médios \pm desvio padrão foram iguais a pH = 9,1 \pm 2,3; C-orgânico = 189 \pm 70 g kg⁻¹; N-total = 21,5 \pm 7,0 g kg⁻¹; P-total = 10,8 \pm 6,1 g kg⁻¹; K-total = 1,4 \pm 0,5 g kg⁻¹; Ca-total = 102 \pm 75,5 g kg⁻¹; Mg-total = 4,0 \pm 2,0 g kg⁻¹; S-total = 10,1 \pm 4,4 g kg⁻¹. Vale a pena ressaltar a relação N-total/P-total, próxima de 2:1, o que em termos agronômicos pode resultar num aporte de fósforo aos solos acima, inclusive, da necessidade da maioria das culturas no referido nutriente. Além disso, convém observar também a relação C/N do LE que é menor do que 15 indicando condições favoráveis à mineralização do N orgânico.

Das alternativas para a disposição final desse resíduo podem ser citadas: disposição em aterros sanitários, produção de agregados para a construção civil e a sua utilização em solos agrícolas. No Brasil, os lodos de esgoto têm sido dispostos em aterros sanitários, mas os elevados

custos, de 40 a 60% dos custos operacionais das ETE's, (CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA E GESTÃO AMBIENTAL URBANA, 2001) as limitações quanto à capacidade física de recebimento em longo prazo, a possibilidade de contaminação de solo e água e a liberação de odores ofensivos conduzem à procura por alternativas mais viáveis como já ocorre em outros países (Tabela 1).

Tabela 1 - Produção anual e vias de disposição de lodo de esgoto

País	Ano	Produção 1000 t	-----%-----				
			Aterro	Incineração	Oceano	Agricultura	Outros
Japão	1994	1413	80	-----	1	13	6
EUA	1888	4112	3	16	6	33	42
Reino Unido	1994	1500	16	5	28	51	-----
Alemanha	1994	2750	65	10	-----	25	-----
França	1994	900	53	20	-----	27	-----
Portugal	1994	200	12	-----	8	80	-----

Adaptado de Santos (1996)

A utilização do LE em áreas agrícolas parece ser a alternativa mais promissora, pois resulta em duplo benefício: o ecológico referente à devolução ao solo do carbono orgânico e dos nutrientes utilizados para a produção de biomassa vegetal que são exportados para os centros urbanos e o benefício social pela possibilidade de aumento da produtividade das culturas e menor impacto sobre o meio ambiente, esta última, em comparação às outras possibilidades de descarte do resíduo.

A aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas, todavia, requer que alguns critérios sejam observados quanto às espécies de plantas cultivadas, doses e teores máximos de metais permitidos. No Brasil o Conama (Conselho Nacional de Meio Ambiente) está trabalhando no sentido de estabelecer critérios próprios, baseados em pesquisas realizadas em âmbito nacional. No Estado de São Paulo, em 1999, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) publicou a norma P4.230 (CETESB, 1999) regulamentando o uso agrícola de lodo de esgoto. Nessa norma são estabelecidos os critérios para se calcular a dose de LE a ser aplicada aos solos agrícolas, baseados em atributos do resíduo, como o teor de metais pesados e de nitrogênio.

Os metais pesados, não nutrientes de plantas (Cd, Cr, Ni e Pb), adicionados aos solos via lodo de esgoto não têm representado perigo quanto aos problemas de fitotoxicidade o que foi demonstrado por vários trabalhos realizados no Brasil (BERTONCINI, 1997; ANDRADE, 1999;

ANJOS, 1999; OLIVEIRA, 2000, VELASCO-MOLINA, 2004). Quanto aos metais nutrientes de plantas (Cu, Fe, Mn e Zn) alguns trabalhos evidenciaram o aumento na sua disponibilidade, avaliada com extrator químico, com a aplicação de doses de lodo de esgoto em diferentes solos e para várias culturas (SILVA et al., 2001; PIRES et al., 2003; NASCIMENTO et al., 2004). A absorção desses elementos pelas plantas, contudo, esta relacionada com outros fatores além do simples aumento de seus teores no solo tais como: características do solo; da espécie vegetal e da natureza do lodo de esgoto e tipo de tratamento (McBRIDE, 2003). Os maiores problemas verificados na utilização agrícola do lodo de esgoto dizem respeito ao nitrogênio estão relacionados à eficiência do resíduo em fornecer N para as plantas (COX, 1995; CORREA, et al. 2005); ao acúmulo de N-orgânico no solo passível de ser mineralizado (OLIVEIRA, 2000; VIEIRA; CARDOSO, 2003) e seus possíveis reflexos na lixiviação de nitratos (ANJOS; MATTIAZO, 2000; OLIVEIRA et al., 2001). Para solos arenosos com baixa capacidade de retenção de íons o aporte de fósforo em quantidades acima das aproveitáveis pelas plantas também pode causar efeitos deletérios no ambiente (SARKAR; O'CONNOR, 2004; MAGUIRE et al. 2000).

Nesse contexto, a utilização de lodo de esgoto em áreas agrícolas como fonte de nutrientes de plantas vem sendo estudada há algum tempo em culturas como soja e trigo (BROWN et al., 1997, BARBARICK; IPPOLITO, 2000), milho (KELLING et al., 1977, BETTIOL; CARVALHO, 1982; BERTON et al., 1989; SILVA et al., 2002, NASCIMENTO et al. 2004), feijão e girassol (DESCHAMPS; FAVARETTO, 1997), videira (KORBOULEWSKY et al. 2002), espécies florestais (GUEDES, 2000; ANDRADE; MATTIAZZO, 2000; SOARES, 2003; VELASCO-MOLINA, 2004) e cana-de-açúcar (MARQUES, 1990; MARQUES, 1996; SILVA et al, 1998; BERTONCINI, 2002; OLIVEIRA et al. 2002).

Dentre as culturas citadas acima, para as condições brasileiras, a cana-de-açúcar ocupa uma posição de destaque no cenário do agronegócio brasileiro, tanto para a produção de açúcar quanto de álcool combustível. De um modo geral a cultura canavieira necessita de um suprimento adequado de N e de P considerando que 1 tonelada de colmos exporta de 740 a 1100 g de N e de 27 a 62 g de P (ORLANDO FILHO, 1983). Além disso, deve-se considerar que os produtos finais da indústria canavieira, açúcar e álcool, passam por etapas na fase de produção que virtualmente eliminam a chance de contaminação com metais pesados e/ou patógenos provenientes do LE.

Neste sentido, considerando a necessidade de um meio racional de descarte do lodo de esgoto, a importância socioeconômica da cultura da cana-de-açúcar, a necessidade de um fornecimento adequado de N e P para a planta e os possíveis problemas verificados na utilização do LE como fonte de nutrientes na agricultura o presente estudo teve como objetivos: i) avaliar a eficiência do lodo de esgoto em fornecer nutrientes, em especial nitrogênio e fósforo, para a cana-de-açúcar sob condições de campo, na presença e ausência de fontes minerais desses nutrientes; ii) avaliar os efeitos da utilização de lodo esgoto na fertilidade do solo, na nutrição da planta, nos rendimentos agrotecnológicos da cultura e nos teores de metais pesados no sistema solo-planta.

As hipóteses testadas foram: a) a utilização de lodo de esgoto na adubação da cana-de-açúcar pode reduzir em quase 100% o emprego de adubos minerais nitrogenados no cultivo de cana-soca e cerca de 30-50% do adubo fosfatado no cultivo de cana-planta; b) as doses de lodo de esgoto aplicadas não causarão problemas relacionados ao acúmulo de metais pesados no solo, na planta e no caldo da cana; c) o uso de lodo de esgoto como fonte de nutrientes não resultará em problemas nutricionais na cultura nem efeitos negativos na produção de colmos e teor de açúcar.

Esta tese foi dividida em dois capítulos: No primeiro capítulo é relatado um experimento conduzido por dois anos num Argissolo Vermelho cultivado com cana (soqueiras de terceiro e quatro cortes) e lodo de esgoto com e sem aplicação adicional de fertilizante nitrogenado. O segundo capítulo versa sobre um experimento conduzido por um ano agrícola num Argissolo Amarelo eutrófico cultivado com cana (cana-planta) e lodo de esgoto com e sem aplicação adicional de fertilizante fosfatado.

REFERÊNCIAS

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

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

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

ANJOS, A.R.M. **Lixiviação de espécies químicas em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido e disponibilidade de metais pesados para plantas de milho.** 1999. 191p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em Latossolos repetidamente tratados com biossólidos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.4, p.769-776, 2000.

BARBARICK, K.A.; IPPOLITO, J.A. Nitrogen equivalency of sewage sludge biosolids applied to dryland winter wheat. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, p.1345-1351, 2000.

BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.187-192, 1989.

BERTONCINI, E.I. **Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido: extração seqüencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas.** 2002. 195p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BERTONCINI, E.I. **Mobilidade de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto.** 1997. 90p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T. Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizante organo-mineral IPT na cultura de milho. **Fertilizantes**, São Paulo, v.4, n.1, p.14-15, 1982.

BROWN, S.; ANGLE, J.S.; CHANEY, R.L. Correction of limed biosolid induced manganese deficiency on a long term field experiment. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, p.1375-1384, 1997.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA E GESTÃO AMBIENTAL URBANA. Utilização agrícola do lodo de esgoto como fertilizante. Disponível em: <<http://www.bis.com.br/unilivre/centro/experiencia/015.html>>. Acesso em: 17 fev. 2004.

CORREA, R.S.; White, R.E.; Weatherley, A.J. Biosolids effectiveness to yield ryegrass based on their nitrogen content. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.274-280, 2005.

COX, D.A. Pelletized sewage sludge as a fertilizer for containerized plants: plant growth and nitrogen leaching losses. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.18, n.12, p.2783-2795, 1995.

DESCHAMPS, C.; FAVARETTO, N. Efeito do lodo complementado com fertilizante mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura do feijoeiro e do girassol. **Sanare**, Curitiba, v.8, p.33-38, 1997.

- GUEDES, M. **Efeito do lodo de esgoto (biossólidos) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto.** 2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- KELLING, K.A.; WALSH, L.M.; KEENEY, D.R.; RYAN, J.A.; PETERSON, A.E. A field study of the agricultural use of sewage sludge: Effects on soil N and P. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, n.4, p.345-352, 1977.
- KORBOULEWSKY, N.; DUPOUYET, S.; BONIN, G. Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals and phosphorus accumulation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.31, p.1522-1527, 2002.
- MAGUIRE, R.O.; SIMS, J.T.; COALE, F.J. Phosphorus solubility in biosolids amended soils in the Mid-Atlantic region of the USA. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, p.1225-1233, 2000.
- MARQUES, M.O. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar.** 1996. 111p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal. 1996.
- MARQUES, M.O. **Efeitos da aplicação de lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar.** 1990. 164p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- McBRIDE, M.B. Toxic metals in sewage amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks? **Advances in Environmental Research**, Amsterdam, v.8, p.5-19, 2003.
- 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, p.109-141, 2000.
- MORENO, J.L.; GARCÍA, C.; HERNANDEZ, T.; PASCUAL, J.A. Transference of heavy metals from a calcareous soil amended with sewage sludge compost to barley plants. **Bioresource Technology**, London, v.55, p.251-258, 1996.
- NASCIMENTO, C.W.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. 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.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; ROSSETTO, R. Efeito 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.505-520, 2002.

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

OLIVEIRA, F.C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana de açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro, IAA/PLANALSUCAR, 1983. 368p. (Coleção Planalsucar, 2).

PIRES, A.M.M. **Disponibilidade de Zn e Cu adicionado a solos via lodo de esgoto para plantas de arroz**. 1998. 55p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SANTOS, H.F. **Uso agrícola do lodo das estações de tratamento de esgotos (ETEs): subsídios para a elaboração de um norma brasileira**. 1996. 74p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Saneamento), Universidade Mackenzie, São Paulo, 1996.

SARKAR, D.; O’CONNOR, G.A. Plant and soil responses to biosolids-phosphorus in two Florida soils with high phosphorus content. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.35, n.12, p.1569-1589, 2004.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.13, p.1-8, 1998.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; BERNARDES, E.M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.5, p.831-840, 2001.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D. Alternativa agrônômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I – Efeito na produção de milho e adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.487-495, 2002.

SOARES, M.T.S. **Taxas de mineralização e de lixiviação do nitrogênio e alterações da fertilidade do solo de um Latossolo Vermelho-Amarelo degradado e outro não-degradado fertilizados com biossólido e florestados com *Eucalyptus grandis***. 2003. 142p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TSUTYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; SOBRINHO, P.A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J.; MELO, W.J. MARQUES, M.O. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p.41-88.

VELASCO-MOLINA, M. **Nitrogênio e metais pesados em Latossolo e Eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólido**. 2004. 66p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)– Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

VIEIRA, R.F.; CARDOSO, A.A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.867-874, 2003.

2 USO DE LODO DE ESGOTO EM SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE DE NITROGÊNIO: PARÂMETROS DA FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DA PLANTA E RENDIMENTOS DA CULTURA

Resumo

A utilização agrícola de resíduos orgânicos como fonte de carbono e nutrientes pode trazer benefícios para a fertilidade dos solos e trazer, ao mesmo tempo, benefícios sociais e ambientais considerando as possíveis vias de destinação racional do mesmo. Um desses resíduos é o lodo gerado ao final do tratamento do esgoto sanitário. Apesar do lodo de esgoto (LE) apresentar em sua constituição consideráveis quantidades de nitrogênio este se encontra basicamente na forma orgânica e são poucos os trabalhos conduzidos no Brasil que estudaram a necessidade ou não de se aplicar N-mineral junto do resíduo para a adequada nutrição das plantas. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo quantificar a resposta de soqueiras de cana-de-açúcar de primeiro corte com substituição da adubação nitrogenada pela aplicação de lodo de esgoto num experimento conduzido sobre um Argissolo Vermelho distrófico cultivado com a variedade RB 855536 nos anos agrícolas de 2002/03 (3º corte) e 2003/04 (4º corte). Foram testados oito tratamentos num esquema fatorial $3 \times 2 + 2$ sendo três doses de N: 0, 60 e 120 kg ha⁻¹, duas épocas de incorporação do LE e dois tratamentos adicionais: controle sem adubação e adubação mineral convencional. As épocas referem-se a incorporação do lodo ao solo: imediatamente após a aplicação e depois de 60 dias da aplicação. Em todos os tratamentos, com exceção do controle e adubação mineral, foi feita a aplicação de lodo de esgoto na dose de 14 e 16 t ha⁻¹, respectivamente em 2002/03 e 2003/04. Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação de N adicional resultou em acúmulo de formas orgânicas de nitrogênio no solo. Aumentos nos teores de N-inorgânico (NH₄⁺ + NO₃⁻) também foram observados nesses tratamentos. A dose de LE, sem suplementação com N mineral via fertilizante (LE+0N), foi suficiente para manter o teor de nitrogênio no solo em níveis similares aos observados no tratamento com adubação mineral (AM). O solo e as plantas de cana de açúcar no que se refere a nutrição, produção de colmos e de caldo não foram prejudicadas com a aplicação do LE. Os dados obtidos permitem concluir que a suplementação do LE com fertilizante nitrogenado não é necessária.

Palavras-chave: Biossólido, Resíduo, Nitrato, Amônio, Adubação de soqueiras, Metais pesados

Abstract

Sewage sludge use in sugarcane ratoons as nitrogen source: soil fertility; plant nutrition and crop yield

The use of sewage sludge on land can improve soil fertility and promote environmental and social benefits comparing to the others residue discharge forms. One of these residues is the sewage sludge (SS), resulting from the raw sewage treatment. Although SS has a level of nitrogen around 2% (dry weight basis) the element is present mainly in organic forms and there are few studies to evaluate the needs of additional mineral N application considering ratoon

sugarcane nutrition and yield. In this study the SS was applied to sugarcane ratoon (RB855536), growing in an Ultisol (Argissolo Vermelho Amarelo distrófico), in levels of 14 and 16 t ha⁻¹ of SS (dry base), respectively on 2002/03 (1st harvesting) and 2003/04 (2nd harvesting). The additional application of mineral nitrogen fertilizers was made in three levels: 0, 60 and 120 kg ha⁻¹. The statistical design adopted was factorial scheme 3 x 2 + 2 (nitrogen level; incorporation time and 2 additional treatments in a randomized block. The time of incorporation tested were: immediately after residue application and 60 days after that and the two additional treatments were: control without fertilization and traditional mineral fertilization to ratoon sugarcane. The results showed that the addition of additional N caused an increase in the soil content of nitrogen, in organic and inorganic forms. The soil N in treatments with SS (SS + 0N) was similar to those from mineral N fertilization. Plant nutrition, stalk production, and juice yield were not affected by sewage sludge application and the residue can supply the needs of nitrogen of sugarcane ratoon. The data allows concluding that the additional application of nitrogen fertilizer is not necessary with SS application of 14 Mg ha⁻¹.

Key-words: Biosolid, Nitrogen, Nitrate, Ammonium, Soil Fertility; Ratoon's fertilization

2.1 Introdução

No cenário do agronegócio brasileiro a cultura da cana-de-açúcar ocupa lugar de reconhecido destaque mantendo o status de produto agrícola com a maior safra no país, cerca de 400 milhões de toneladas e ocupando uma área plantada, no ano de 2004, de mais de cinco milhões de hectares cultivados (IBGE, 2004; PROCANA, 2004). Tendo em vista que áreas cultivadas com cana-de-açúcar são relativamente próximas a centros urbanos e a maioria dos solos tropicais se caracteriza pelas baixas quantidades de nutrientes e matéria orgânica, as áreas canavieiras tem se tornado uma opção viável para receber resíduos orgânicos urbanos e/ou industriais como fonte de carbono e nutrientes. Nos últimos anos vêm crescendo a demanda por soluções práticas que permitam a reciclagem do lodo de esgoto (LE) gerado no tratamento dos esgotos sanitários de modo que haja o menor impacto possível ao solo e à água.

Da união desses interesses algumas estações de tratamento de esgoto (ETE) têm obtido êxito em programas de utilização agrícola de lodo de esgoto em canaviais, nos quais o resíduo atua como fonte de nitrogênio. Evidentemente, essas ações são acompanhadas por monitoramento técnico com a finalidade de se evitar a degradação dos recursos naturais. Os estudos realizados até o momento mostram que a aplicação de LE não ocasionou problemas quanto a biodisponibilização de metais pesados (MARQUES, 1990; MARQUES, 1996; SILVA et al., 1998; BERTONCINI, 2002; OLIVEIRA et al. 2002). A maior restrição à aplicação de LE nos solos agrícolas parece estar associada ao aporte de nitrogênio. Enquanto alguns estudos

evidenciaram problemas quanto à lixiviação de nitrato (ANJOS; MATTIAZZO, 2000; OLIVEIRA et al., 2001) outros experimentos (VIEIRA; CARDOSO, 2003; BOEIRA et al., 2002) têm demonstrado que o cálculo da dose de LE em função do nitrogênio potencialmente mineralizável pode, devido às condições climáticas e características dos solos, subestimar as quantidades de N-inorgânico efetivamente disponibilizadas tendo como resultado a liberação de nitrogênio suficiente para suprir as necessidades das culturas sem que seja necessário utilizar fontes minerais do mesmo. No Brasil, contudo, pouca atenção tem sido dispensada a esse tema e especificamente para a cultura da cana-de-açúcar apenas alguns poucos trabalhos científicos foram conduzidos com o intuito de incrementar o conhecimento nessa área (MARQUES, 1990; SILVA, 1995; MARQUES, 1996; OLIVEIRA, 2000).

Nesse sentido este trabalho teve por objetivos avaliar o potencial do lodo de esgoto em fornecer N para a cana-de-açúcar (socas de segundo corte) em substituição à adubação mineral, bem como os reflexos dessa prática nos atributos químicos do solo e nos rendimentos da cultura nas safras de 2002/03 e 2003/04.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Revisão de Literatura

2.2.1.1 Aspectos gerais do nitrogênio na agricultura

O nitrogênio (N) é um elemento essencial para o crescimento das plantas sendo exigido em grandes quantidades em comparação aos demais macronutrientes (K, Ca, Mg e S). Nas situações em que ocorre deficiência de N, as plantas apresentam sintomas típicos como clorose generalizada das folhas mais velhas e redução no crescimento (MELGAR, et al., 1999).

Apesar da sua grande importância na nutrição dos vegetais o nitrogênio não é encontrado na forma disponível e em quantidades suficientes para o adequado suprimento da maioria das plantas cultivadas, nos solos. São praticamente inexpressivas as quantidades encontradas em rochas e minerais devido à solubilidade e instabilidade química dos compostos nitrogenados minerais. Quantidades consideráveis de nitrogênio em rochas são observadas somente nas formas dos sais NaNO_3 e KNO_3 nas regiões desérticas do Chile e Índia (VITTI et al., 1984).

A atmosfera, que apresenta cerca de 78% de nitrogênio gasoso em volume, é uma reserva praticamente inesgotável do nutriente e de onde provem a maior parte do N utilizado na

agricultura e fixado através de processos industriais, como a síntese de amônia pelo processo *Harber-Bosch* (EPSTEIN, 1975), ou biológicos como a fixação biológica do N por microrganismos associativos e de vida livre (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Nos solos o nitrogênio pode estar presente nas formas inorgânicas ou orgânicas com predomínio desta última que pode compreender mais de 98% do conteúdo total de N (RAIJ, 1991).

A matéria orgânica pode ser considerada como uma fonte de nitrogênio e outros nutrientes e a sua decomposição libera os elementos associados ao carbono tetravalente (C^{4+}) nos compostos orgânicos (MELO, 1978). Neste sentido a utilização de resíduos orgânicos para fornecer N e outros nutrientes para as plantas é uma prática antiga que pode trazer o duplo benefício de incrementar a fertilidade dos solos e usá-los como meio depurador da carga orgânica potencialmente poluente e neste contexto se insere a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas.

2.2.1.2 Transformações do nitrogênio no solo adicionado via lodo de esgoto

O lodo de esgoto é um resíduo semi-sólido resultante do tratamento do esgoto sanitário. É um material predominantemente orgânico cujas características químicas e físicas são variáveis e dependentes do tipo de tratamento adotado pela estação de tratamento de esgoto (ETE), da origem e da predominância de fontes domésticas ou industriais desse esgoto. Este resíduo apresenta, em média, cerca de 2% de nitrogênio total em sua composição com predomínio de compostos orgânicos como as proteínas e os aminoácidos, com destaque especial para as primeiras (ANDRADE, 2004).

Considerando que de 50-90% do conteúdo total de nitrogênio presente nos lodos de esgoto está na forma orgânica (SOMMERS, 1977) o conhecimento dos principais processos envolvidos nas transformações deste elemento nos solos é de grande importância para se avaliar os riscos envolvidos na disposição de tais resíduos tanto do ponto de vista agrônômico como ambiental. Esses processos, ilustrados na Figura 1, serão brevemente comentados com base nos textos de Hue (1995) e Epstein (2003).

A transformação do N-orgânico em N-mineral, conhecida como mineralização compreende dois processos biológicos que ocorrem em seqüência: amonificação e nitrificação.

Para que ocorra a amonificação, inicialmente as proteínas são clivadas em aminoácidos (proteólise) e posteriormente os grupamentos aminados ($-NH_2$) são convertidos em NH_3 . A

amônia é então protonada resultando em amônio (NH_4^+) que é um íon mais estável e menos tóxico às plantas e microorganismos que a amônia.

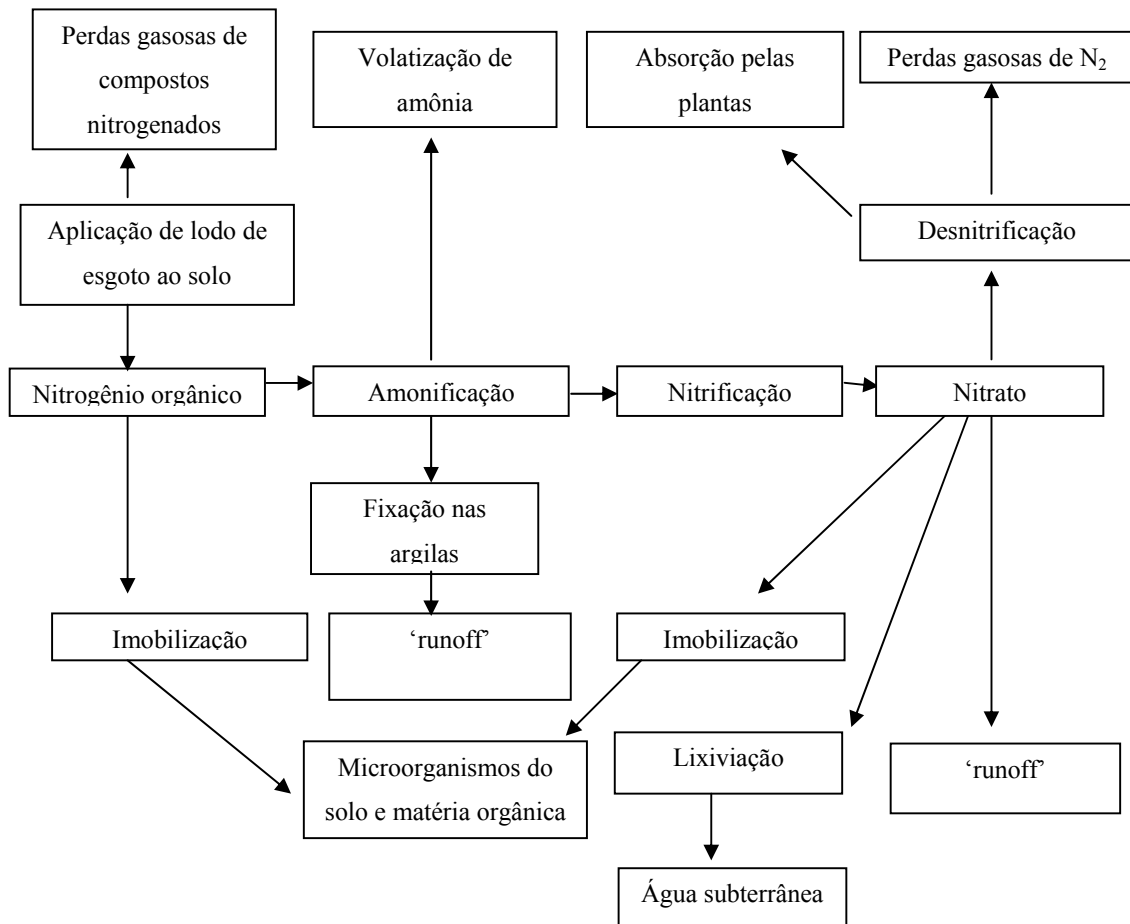


Figura 1 - Principais processos de transformação, no solo, do nitrogênio orgânico contido em lodo de esgoto. Adaptado de Epstein (2003)

A amonificação é a etapa limitante do processo de mineralização do N (EPSTEIN, 2003) e é fortemente favorecida quando a relação C/N do substrato (resíduo ou solo+resíduo) resulta em valores menores que 15 (HUE, 1995). Relações C/N > 30/1, via de regra, resultam em imobilização do N que é assimilado pelos microorganismos ficando temporariamente indisponível as plantas. Mediante a redução da relação C/N, seja pela degradação do carbono ou adição de N mineral, há diminuição na oferta de energia (C) para esses microorganismos o que resulta na liberação do N assimilado em suas estruturas (KIEHL, 1987).

Uma vez presente no solo o NH_4^+ pode seguir diversos caminhos: ser imobilizado pelos microrganismos; absorvido pelas plantas; adsorvido no complexo de troca dos colóides do solo; ser perdido para a atmosfera por volatilização de amônia sob condições alcalinas.

Porém, nos solos bem drenados com predomínio de condições aeróbias o amônio é rapidamente oxidado a nitrato através do processo de nitrificação.

A nitrificação é um processo mediado por bactérias quimiolitotróficas e ocorre em duas etapas: nitritação e nitrificação. Na primeira etapa bactérias do gênero *Nitrossomonas* oxidam o amônio a nitrito (NO_2^-). Na nitrificação o nitrito é oxidado a nitrato (NO_3^-) por bactérias do gênero *Nitrobacter*. Para que a nitrificação ocorra algumas condições são necessárias: presença de O_2 livre, umidade, temperatura acima de 0°C e pH acima de 4,5 (STEVENSON, 1986).

A exemplo do amônio, o destino do nitrato no solo se divide em vários caminhos: imobilização na biomassa microbiana; lixiviação para camadas profundas do perfil do solo; perdas para a atmosfera na forma de N_2 ou N_2O em condições fortemente redutoras.

Neste contexto, para compreender todos os aspectos relacionados à dinâmica do N aplicado ao solo via lodo de esgoto deve-se considerar além do conteúdo total as taxas de mineralização do N-orgânico em N-inorgânico. Acúmulos de N-orgânico podem formar uma reserva do nutriente no solo que, dependendo das condições climáticas e da atividade dos microrganismos, pode ser mineralizada liberando N-inorgânico. O acúmulo de NO_3^- nos solos pode trazer conseqüências danosas ao ambiente devido a grande mobilidade desse elemento no perfil do solo que permite ao mesmo atingir corpos d'água e causar a eutrofização desses mananciais.

A aplicação de lodo de esgoto aos solos visando o fornecimento de N é, portanto, uma prática que altera a dinâmica das formas nitrogenadas e pode contribuir tanto para o aumento da produção agrícola e nutrição das plantas como também causar sérios problemas ambientais.

Neste contexto, Oliveira et al. (2001) trabalhando com um Latossolo Amarelo distrófico tratado por dois anos com doses de lodo de esgoto alcalino (33, 66 e 99 t ha^{-1} , base seca em 1996/97 e reaplicação de 37, 74 e 110 t ha^{-1} , base seca em 1997/98) e cultivado com cana-de-açúcar verificaram aumentos na quantidade de N-orgânico com as doses de resíduo. No final do primeiro ano foram verificados aumentos de 23, 23,3 e 38% no conteúdo de N-orgânico, na camada de 0-0,3 m, em relação à testemunha. No final do segundo ano tais incrementos corresponderam a 8,2, 15,4 e 9,6% em relação ao conteúdo de N-orgânico no final do primeiro

ano. Esses aumentos ficaram restritos à camada superficial de 0-0,3 m não sendo observados aumentos significativos abaixo de 0,3 m de profundidade. Com relação aos teores de N-inorgânico ($\text{N-NH}_4 + \text{NO}_3$) foi observado um aumento médio de 25 vezes em relação a testemunha na camada de 0,9-1,2 m evidenciando a movimentação dessas formas nitrogenadas.

Inman et al. (1992) verificaram que apesar da lixiviação de nitrato a 1 m de profundidade doses de 150 a 300 t ha⁻¹ (base seca) de um composto a base de lodo de esgoto proporcionaram, 30 meses após sua aplicação, aumentos de duas a três vezes nos teores de N-orgânico na camada de 0-0,15 m quando comparado com a testemunha. Todavia, Vieira; Cardoso (2003) não verificaram aumentos no teor de N na biomassa microbiana proporcionais aos aumentos nos teores de N em função da aplicação de lodo de esgoto. Desse modo, os autores descartaram a possibilidade de que grandes quantidades de N tenham sido imobilizadas pela microbiota do solo até os 150 dias após a aplicação do resíduo.

A quantidade de N mineralizada da matéria orgânica do lodo de esgoto é variável de acordo com a natureza do material de origem e com o tipo de tratamento utilizado. De maneira geral lodos de esgoto são resíduos com estreita relação C/N, com baixo suprimento energético e com material protéico de fácil degradação pelos microrganismos (LERCH et al., 1993). Estas propriedades possibilitam uma rápida liberação de N-inorgânico em quantidades proporcionais às quantidades de N-orgânico aplicadas (GILMOUR; SKINNER, 1999; ROWELL et al., 2001).

Acúmulos de N-inorgânico proporcionais às doses de N-orgânico aplicadas, via lodo de esgoto de diferentes origens (ETEs de Barueri/SP e Franca/SP), num Latossolo Vermelho distroférico foram verificados por Boeira et al. (2002) sob condições de laboratório. Os autores observaram uma fração de mineralização média do N-orgânico em torno de 31% e que a velocidade da mineralização é uma função do tipo de lodo de esgoto e das doses aplicadas.

Vieira; Cardoso (2003) cultivaram milho na época da seca e das chuvas num Latossolo Vermelho distroférico tratado com doses de lodo de esgoto digerido anaerobicamente (ETE-Barueri/SP) suficientes para fornecer uma, duas, quatro e oito vezes a necessidade de N pela cultura (50 e 100 kg ha⁻¹, respectivamente para a época da seca e das chuvas). Os autores observaram aos 150 dias após a emergência das plantas no período seco que o teor de N-inorgânico ($\text{N-NH}_4 + \text{NO}_3$) no tratamento que recebeu lodo de esgoto para fornecer uma vez a necessidade de N da cultura apresentava teores de N-inorgânico cinco vezes maiores que o tratamento fertilizado com adubos minerais. Na época das chuvas não houve diferença nos teores

de N-inorgânico entre o tratamento com LE e com fertilizante indicando, segundo os autores, que nesta época estariam ocorrendo maiores perdas de N-inorgânico devido a lixiviação de nitratos. Convém salientar, entretanto, que não foram feitas menções por parte dos autores quanto a produção de fitomassa nem de absorção de N pelo milho, que na época das chuvas, provavelmente teria sido maior e poderia, em parte, explicar os menores teores de N-inorgânico.

Com relação à disponibilidade do N, aplicado via lodo de esgoto, Cunningham et al. (1975) verificaram que a incorporação do lodo de esgoto ao solo causou aumentos na produção de grãos de milho devido ao aumento na disponibilidade de N. Isso também foi observado por Da Ros et al., (1993) que verificaram aumentos na produção de matéria seca de aveia e ervilhaca adubadas com lodo de esgoto. A absorção de N nos tratamentos com adubação mineral (110 kg ha⁻¹ de N) e lodo de esgoto na dose de 160 t ha⁻¹, 92% de umidade, (566 kg ha⁻¹ de N total) foram similares. Oliveira et al. (1995) avaliaram a produção de matéria seca de sorgo cultivado num Latossolo Vermelho Escuro tratado com lodo de esgoto em casa de vegetação e relataram que a aplicação de 5 t ha⁻¹ (107 kg ha⁻¹ de N total) de LE complementado com N (13 kg ha⁻¹ de N via uréia) não produziu efeitos significativos em comparação ao LE aplicado sem complementação.

Cox (1995) estudando o aporte de N procedente de diferentes fonte (fertilizante inorgânico de liberação controlada, fertilizante inorgânico altamente solúvel; lodo de esgoto proveniente de tratamento primário e lodo de esgoto de tratamento secundário) para diferentes culturas observou que os lodos forneceram, de forma segura, quantidades adequadas de N para as plantas de crescimento lento e baixa taxa de absorção de N (*Tagetes erecta* L.). Por outro lado para plantas de crescimento rápido e elevadas taxas de absorção de N (*Impatiens* sp.) foi necessário combinar os lodos com fertilizantes nitrogenados solúveis no sentido de aumentar a disponibilidade do nutriente.

Trabalhando com um Latossolo e um Espodossolo, Corrêa et al. (2005) avaliaram a eficiência de um lodo de esgoto submetido a diferentes tipos de tratamento (irradiação por sol; compostado; seco a 250° C e tratado com CaCO₃ 30% m/m) no fornecimento de N para o azevém. O lodo irradiado por sol mostrou a mais alta eficiência agrônômica entre os demais tipos de lodo proporcionando ao azevem condições de atingir a maior produção de matéria seca com a menor dose.

Em experimento em vasos Simonete et al. (2003) cultivaram milho num Argissolo Amarelo, em vasos, por 50 dias com doses de lodo de esgoto iguais a 10, 20, 30, 40 e 50 t ha⁻¹.

Os autores verificaram que a aplicação de lodo de esgoto na dose equivalente a 10 t ha⁻¹ (291 kg ha⁻¹ de N) aumentou a produção de matéria seca em 66% e a quantidade de N acumulada na fitomassa em 22% em comparação ao tratamento controle.

2.2.1.3 Importância do nitrogênio para a cultura da cana-de-açúcar

O nitrogênio representa apenas 1% da matéria seca total da planta de cana-de-açúcar, entretanto, desempenha um importante papel no seu desenvolvimento pois está diretamente envolvido na síntese de clorofila, de aminoácidos essenciais e na produção de carboidratos (DILLEWIJN, 1952; ALEXANDER, 1973). De acordo com Clements et al., (1941) com o aumento no teor de N no solo a cana-de-açúcar produz mais fitomassa e aumenta o conteúdo desse nutriente nas folhas e nos entrenós. O nitrogênio aumenta o comprimento dos colmos ocasionando a redução na espessura da parede celular podendo refletir numa diminuição da porcentagem de fibras das plantas (DAS apud ORLANDO FILHO, 1983). Considerando a ordem de extração de nutrientes pela cana-de-açúcar verifica-se que o potássio é extraído em maior quantidade que o nitrogênio (K>N>Ca>Mg>P) o que em termos de quantidade necessária para produzir 100 t de colmos equivale a 174 kg de K, 143 de N, 87 de Ca, 49 de Mg e 19 de P (ORLANDO FILHO, 1983).

Há indicações de que pode haver aumento na produção de colmos em função do aumento das doses de N aplicadas, porém, haveria também aumento na umidade dos colmos o que resultaria por sua vez a uma redução no teor de sacarose (KORNDORFER et al., 1992).

Segundo Epstein (1975) o estudo do papel do nitrogênio quase se confunde com o da própria bioquímica das plantas sendo que cerca de 80 a 90% do N absorvido pelas plantas devem passar para a forma orgânica, ou seja, reduzidos a NH₃. Esse processo redutor envolve a enzima redutase de nitrato, que contem fósforo, ferro e molibdênio. O NH₃ produzido fará parte dos aminoácidos elaborados pela planta em reações catalisada por várias enzimas e magnésio. Diferentes combinações de aminoácidos resultarão em diversas proteínas nas quais cerca de 18% são representadas pelo nitrogênio.

Sabe-se que a cana-planta é mais eficiente no uso do N, resultando em baixas respostas à aplicação do nutriente neste estágio de desenvolvimento se comparada às soqueiras (DILLEWIJN, 1952). Assim as soqueiras apresentam maior resposta à adubação nitrogenada em relação à cana-planta. Apesar disso em algumas situações não são observadas respostas das soqueiras à aplicação de N (AZEREDO et al., 1986; CARNAÚBA, 1990). Mesmo estudos com

N marcado isotopicamente não têm sido conclusivos sobre o tema (TRIVELIN et al. 1995; TRIVELIN et al. 1996). Alguns autores apontam como fontes alternativas de N para a cana: N mineralizado dos restos da própria cultura (BARNES, 1964); N mineralizado da matéria orgânica do solo (GREENLAND apud DEMATTÊ, 2004); N armazenado nos toletes (CARNEIRO et al., 1995); práticas agrícolas como calagem e movimentação do solo que favorecem a mineralização da matéria orgânica e o aprofundamento das raízes (DEMATTÊ, 2004) e fixação biológica do N por microrganismos de vida livre (MOREIRA; SIQUEIRA 2002). Quanto à eficiência da fixação biológica do N, ainda são poucos os dados sobre a maneira pela qual opera o sistema de transferência do N₂ fixado para a planta, assim como existe a carência de dados ecofisiológicos relativos à associação entre microrganismo-planta (RUSCHEL; VOSE, 1982).

A necessidade de N pela cana-de-açúcar é crucial no período de formação da cultura que vai do período imediatamente após a germinação até o fechamento do canavial o que ocorre normalmente entre os 3 a 5 meses. É nessa época em que ocorre a formação de perfilhos o que vai influenciar no stand final de plantas e conseqüentemente na produtividade. A partir do fechamento do canavial as plantas entram num período de crescimento acelerado desde que tenham boas condições de temperatura e umidade (DILLEWIJN, 1952).

De acordo com Humbert (1968) as plantas jovens de cana-de-açúcar são capazes de armazenar N para utilização posterior, sendo observada uma redução nos teores desse nutriente em diversas partes da planta a partir do 4º mês de idade indicando a remobilização dentro da planta. Segundo o mesmo autor, os melhores rendimentos da cultura de cana-de-açúcar foram obtidos quando a adubação nitrogenada foi realizada dentro dos primeiros quatro meses de idade da cultura.

São poucos os trabalhos que estudaram a resposta da cana-de-açúcar à aplicação de lodo de esgoto como fonte de N com e sem suplementação mineral. Marques (1990) cultivando cana-de-açúcar por duas safras num Latossolo Vermelho Amarelo com a aplicação de doses de lodo de esgoto iguais a 4, 8, 16 e 32 t ha⁻¹ + KCl verificou que a produção de colmos da cana-planta não foi afetada significativamente pelos tratamentos. Nas soqueiras subseqüentes, a produção foi superior apenas no tratamento com a reaplicação 4 t ha⁻¹ de LE + KCl. Nas demais doses a reaplicação resultou em decréscimo na produção de colmos em comparação com a condição de não reaplicação do resíduo. Silva (1995) verificou que a aplicação de lodo de esgoto (0, 20 e 40 t ha⁻¹, base seca) num Argissolo Vermelho Amarelo cultivado proporcionou aumentos na produção

de colmos em comparação à adubação mineral. Marques (1996) verificou aumentos lineares nos teores de N-total no caldo de cana-de-açúcar cultivada num Latossolo Vermelho tratado com 0, 40, 80 e 160 t ha⁻¹ de lodo de esgoto.

2.2.1.4 Lodo de esgoto e disponibilidade de metais pesados no solo

A aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas requer que alguns critérios sejam observados quanto às espécies de plantas cultivadas, doses e teores máximos de metais pesados permitidos. Nos EUA a United States Environmental Protection Agency (USEPA) através das normas regulatórias 40 CFR - Part 503 (Estados Unidos, 1993) estabelecem os critérios para a utilização do lodo de esgoto em áreas agrícolas. No Estado de São Paulo, as normas para esta prática são estabelecidas pela CETESB através da norma técnica P4.230 (CETESB, 1999). A preocupação com a contaminação do solo e da água com metais pesados adicionados aos solos via lodo de esgoto assume importância capital, principalmente, nas situações em que o resíduo é aplicado por longos períodos. De acordo com estimativa de Chang et al., (1997) cerca de 1% da quantidade total de metais pesados adicionados aos solos, via LE, é absorvida pelas plantas refletindo desse modo a baixa fitodisponibilidade dos mesmos.

Estudos envolvendo a disponibilidade de metais pesados para a cultura da cana-de-açúcar cultivada em solos tratados com lodo de esgoto são relativamente escassos (MARQUES, 1996; SILVA et al., 1998; OLIVEIRA; MATIAZZO, 2001; BERTONCINI, 2002).

Marques (1996) estudou a aplicação de doses de LE (0, 40, 80 e 160 t ha⁻¹, 74% de umidade) em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar (SP70-1143) nos teores de Cr, Ni e Pb no solo e na planta. O autor verificou que houve aumento na disponibilidade desses elementos, exceção ao Mn, com o aumento das doses de LE avaliada com extrator HCl 1 mol L⁻¹. Os teores de Ni aumentaram de 0 para 0,8 mg kg⁻¹; Cr de 0,62 para 6,7 mg dm⁻³; Pb de 1,54 para 3,64 mg dm⁻³ da dose 0 para a 160 t ha⁻¹ de LE. Apesar desses aumentos na disponibilidade desses metais os teores na planta (folhas, colmo e palmito) foram semelhantes aos encontrados para a testemunha não indicando a contribuição do LE na disponibilização desses elementos.

Silva et al. (1998) verificaram que a adição de lodo de esgoto (0, 15 e 30 t ha⁻¹, 65% de umidade) provocou incrementos lineares de Cr, Ni e Pb no solo avaliados com DTPA pH 7,3. Destes, o Cr foi o que apresentou os menores incrementos com as doses de LE. Da dose 0 de LE para a dose 30 t ha⁻¹, os teores de Cr passaram de 0,13 para 0,19 mg dm⁻³; Ni variou de 0,54 para 1,20 mg dm⁻³ e Pb variou de 0,86 para 1,31 mg dm⁻³. Houve aumento na biodisponibilidade do Ni

com incremento de 57% da exportação do elemento pela parte aérea da cana-de-açúcar (RB72454). Com os teores disponíveis de Cr, Ni e Pb no solo e de acordo com os valores orientadores para o Estado de São Paulo (Tabela 2) pode-se fazer uma inferência quando a capacidade desse solo em receber adições sucessivas de LE considerando apenas os teores de metais pesados resultando em aplicações anuais de 30 t ha⁻¹ por até 25 anos com o Ni sendo o elemento limitante.

Bertoncini (2002) cultivou cana-de-açúcar (RB72454) em caixas de cimento-amianto com capacidade para 0,5 m³ com dois solos (Latosolo Vermelho Amarelo – LVA e Latossolo Vermelho – LV) com duas doses de LE (0 e 388 t ha⁻¹). A dose de LE adicionou em termos totais 7,87 kg de Cd, 185 kg de Cr, 292 kg de Cu, 138 kg de Ni, 947 kg de Zn e 60 kg de Pb aumentando os teores dos mesmos nos solos. Contudo, o autor verificou que apesar das quantidades adicionadas os teores foliares de Cu, Ni e Zn estiveram abaixo dos limites críticos encontrados na literatura. Os teores de Cr nas folhas variaram de 2,3 a 7,7 mg kg⁻¹ no LVA e de 2,5 a 3,3 mg kg⁻¹ no LV indicando que mesmo na testemunha sem LE houve absorção de Cr. No caldo os teores de Cd, Cr e Ni foram muito baixos e próximos do limite de determinação do ICP-AES. Não foram verificados efeitos deletérios na qualidade da cana-de-açúcar (ATR, Brix) com a adição de LE. Oliveira; Mattiazzo (2001) aplicando doses de LE (33, 66 e 99 t ha⁻¹ em 96/97 e 37, 74 e 110 t ha⁻¹ em 97/98, ambos em base seca) por dois anos agrícolas num Latossolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar (RB785148) adicionaram, com a maior dose e nos dois anos, na camada de 0-0,2 m de profundidade 30,61 mg ha⁻¹ de Cr, 20,92 mg ha⁻¹ de Ni e 12,91 mg ha⁻¹ de Pb. Os autores não verificaram efeitos deletérios dos metais pesados na produção de colmos e os teores foliares de Cd, Cr, Ni e Pb estiveram abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado (Espectrometria de absorção atômica).

Desse modo, verifica-se que nem sempre a presença de metais pesados no solo ou a adição de baixas quantidades dos mesmos resultam, necessariamente, em efeitos danosos para a vegetação e para o solo. Na Tabela 2 podem ser observados os valores orientadores de metais pesados para os solos do Estado de São Paulo (CASARINI et al., 2001). Esses valores dividem-se em: valor de referência, que indica o limite de qualidade para que um solo seja considerado limpo; valor de alerta, que indica uma possível alteração da qualidade natural dos solos e valor de intervenção, que indica o limite de contaminação acima do qual existe risco à saúde humana (CASARINI et al., 2001).

Tabela 2 - Valores orientadores de metais pesados para solos do Estado de São Paulo

Metal	Referência	Alerta	Intervenção		
			⁽¹⁾ Agrícola/APMax	Residencial	Industrial
-----mg kg ⁻¹ -----					
Cu	35	60	100	500	700
Fe	...	...	...	...	...
Mn	...	...	...	...	...
Zn	60	300	500	1000	1500
Cd	<0,5	3	10	15	40
Cr	40	75	300	700	1000
Ni	13	30	50	200	300
Pb	17	100	200	350	1200

Fonte: Casarini et al., (2001). ⁽¹⁾Valor de intervenção para solos no Centro Agrícola/Área de Proteção Máxima. (...) valor não estabelecido.

O estabelecimento de valores para os teores dos diferentes metais pesados, acima dos quais, um solo estará ou não contaminado, é uma prática ainda controversa. O teor de metais pesados nas rochas que dão origem dos solos pode ser extremamente variável mesmo quando se têm materiais de origem – rochas – semelhantes, pois há uma significativa influência do ambiente nas transformações a que essas rochas serão submetidas (GARRET, 2000). Além disso, os processos geoquímicos que atuam na intemperização dos minerais que compõem o solo são complexos e a taxa com que isso ocorre é incerta (FOULER, 1998).

O solo, por ser resultado da intemperização deste material de origem, herda suas características químicas e dessa maneira, se a rocha possui teores elevados de metais, o solo dela originado também deverá apresentar estes altos níveis e vice-versa. Na Tabela 3 são apresentadas as concentrações naturais de metais pesados em alguns solos.

Tabela 3 - Teor total original de alguns metais pesados em diferentes solos

Solo	Material de origem	Cd	Cr	Ni	Pb	Cu	Zn
LV	gnaisse	-	-	41	88	10	-
LU	basalto	-	102	112	19	190	-
LR	basalto	16630	188	100	35	154	-
LR	gnaisse/anfibólito	13	257	50	138	52	72
LR	Calcário	10	143	29	88	53	35
LE	Calcário	8	118	75	111	800	52
LE	Arenito	-	46	90	93	79	-
LE	Itabirito	-	69	-	84	7	-

Adaptado de Guerra et al., 1999

Comparando-se os valores orientadores (Tabela 2) e os teores de metais pesados em diferentes solos (Tabela 3) pode-se observar que alguns solos, em seu estado natural, já apresentam teores considerados como valor alerta ou de intervenção. Visto o exposto, pode-se concluir que ainda existem muitas dúvidas em relação aos riscos da contaminação com metais pesados adicionados via lodo de esgoto. Infelizmente o esclarecimento dessas dúvidas é dependente do tempo, pois estudos em longo prazo ainda são escassos. Uma maneira interessante de se obter esses resultados é monitoramento, das áreas agrícolas em que o resíduo vem sendo utilizado.

Tendo em vista os possíveis benefícios na fertilidade do solo com a aplicação do lodo de esgoto e os reflexos destes sobre a produção de colmos e composição do caldo de cana-de-açúcar este trabalho teve por objetivo verificar a necessidade de se adicionar fertilizantes nitrogenados minerais ao LE aplicado num Argissolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar por dois anos.

2.2.2 Material e Métodos

2.2.2.1 Descrição da área experimental

O presente estudo foi realizado em uma área da Fazenda Boa Esperança, localizada no município de Capivari (SP), de propriedade do Sr. Arlindo Batagin Jr. O clima na cidade de Capivari é do tipo Cwa (classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido. Na Figura 2 podem ser observados os dados referentes à distribuição de chuvas, as temperaturas registradas durante o período experimental e são apresentadas também as datas de aplicação dos tratamentos – aplicação de LE, épocas de incorporação, amostragem foliar e colheita do experimento para as duas safras. Verifica-se que na safra 2002/03 o volume total de chuvas foi de 982 mm e para a safra 2003/04 de 1345 mm.

O solo utilizado foi classificado como sendo um Argissolo Vermelho distrófico (PVd) segundo EMBRAPA (1999) e alguns de seus atributos químicos analisados em amostras coletadas nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m podem ser observados na Tabela 4.

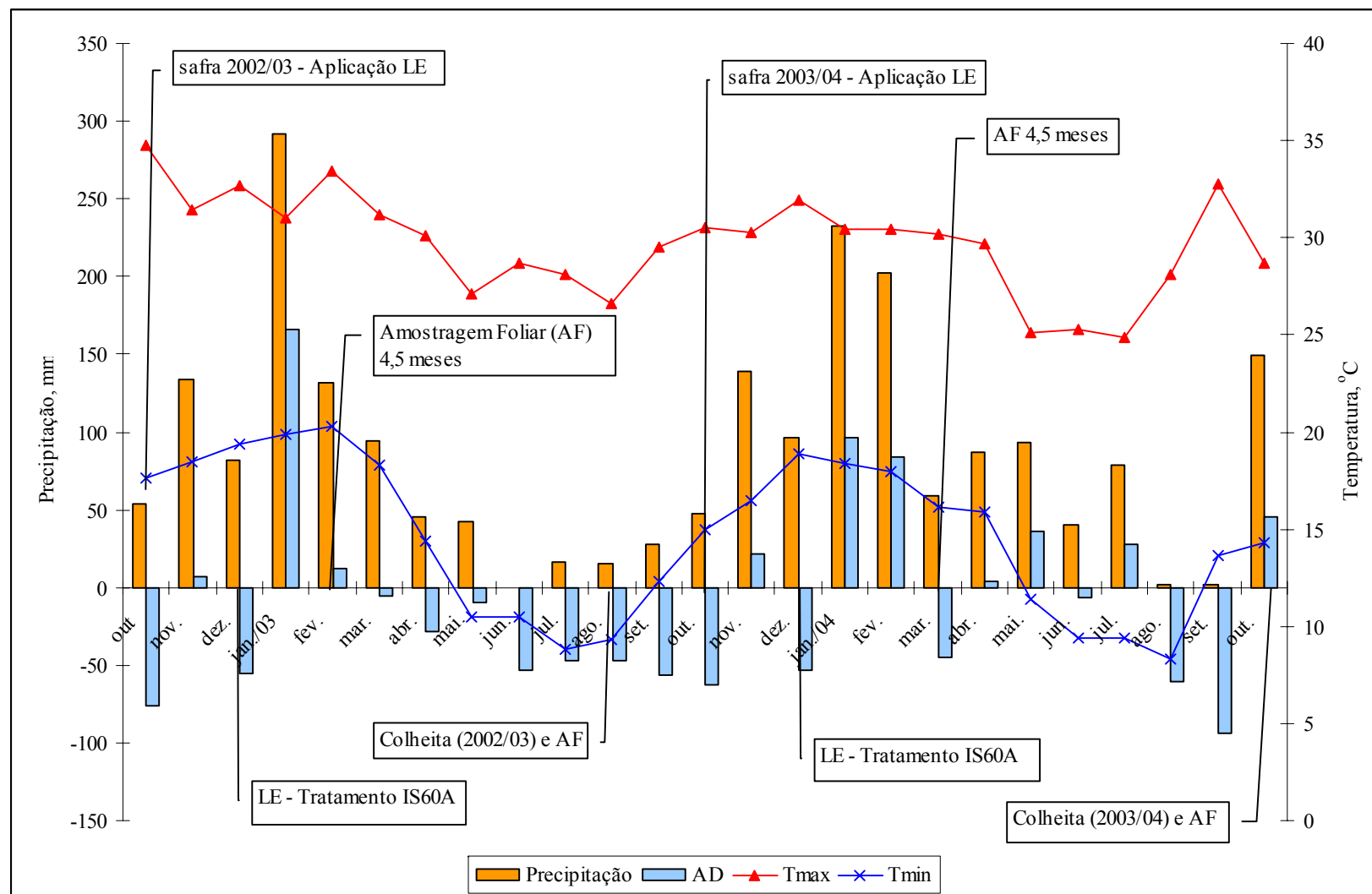


Figura 2 - Precipitação pluviométrica, água disponível (AD = precipitação – evapotranspiração), temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) registradas em Capivari (SP) durante o período de Outubro de 2002 a Outubro de 2004

Tabela 4 - Alguns atributos químicos¹ e físicos² do solo

Prof.	pH CaCl ₂	C-org	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V
m		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							
0-0,2	4,7	12,2	29	0,8	25	10	2	42	36	78	46
0,2-0,4	4,5	12,2	13	0,3	18	9	4	47	27	74	37
Prof.	Argila	Silte	Areia grossa	Areia fina	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂				
m	-----g kg ⁻¹ -----								-----g kg ⁻¹ -----		
0-0,2	381	186	102	331	37,2	12,2	180,0				
0,2-0,4	378	206	137	279	43,0	134,0	92,0				

⁽¹⁾RAIJ et al. (2001); ⁽²⁾CAMARGO et al. (1986). 2 mm ≥ Areia grossa > 0,5 mm ≥ Areia fina > 0,05 mm ≥ Silte > 0,002 mm ≥ Argila

2.2.2.2 Lodo de esgoto utilizado

O lodo de esgoto foi obtido junto à Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ), localizada no município de Jundiaí (SP) e é resultante do tratamento biológico e aeróbio do esgoto sanitário por sistema conhecido como Lagoas Aeradas de Mistura Completa Seguidas de Lagoas de Decantação. O lodo é retirado do fundo das lagoas de decantação com uma idade média de um ano e com 2% de sólidos. A seguir esse lodo recebe a adição de polímeros catiônicos e após centrifugação passa a conter de 18 a 20% de sólidos. Na seqüência o lodo é encaminhado para um sistema de secagem adicional ao ar com revolvimento mecânico por cerca de 120 dias resultando em um resíduo com aproximadamente 40% de sólidos e com uma redução significativa de patógenos. Suas características químicas estão apresentadas na Tabela 5.

2.2.2.3 Tratamentos

As parcelas experimentais constituíram-se de uma área retangular com 10 metros de comprimento e 8,4 metros de largura (equivalente a sete linhas de cana espaçadas de 1,4 m). Como área útil de cada parcela foram consideradas as três linhas centrais descontando-se 1 metro em cada extremidade das linhas (APENDICE A).

Foram estabelecidos 8 tratamentos em esquema fatorial 3 x 2 + 2 distribuídos em delineamento em blocos casualizados com 4 repetições e constituídos de 3 doses de adubo nitrogenado; 2 épocas de incorporação do LE no solo e dois tratamentos adicionais: adubação mineral e um tratamento controle, sem adubação (Tabela 6).

Tabela 5 - Alguns atributos dos lodos de esgoto utilizados. Valores com base na matéria seca

Atributos ¹	2002/03	2003/04
Umidade à 65°C, g kg ⁻¹	722	794
N total, g kg ⁻¹	29,8	26,9
N inorgânico, g kg ⁻¹	0,69	0,69
P, g kg ⁻¹	6,9	8,1
K, g kg ⁻¹	2,1	1,1
Ca, g kg ⁻¹	10,3	12,3
Mg, g kg ⁻¹	2,6	1,6
C-orgânico, g kg ⁻¹	341	294
C/N	11,44	10,92
pH (H ₂ O)	6,2	6,4
Mn, mg kg ⁻¹	619	782
Cu, mg kg ⁻¹	858	849
Cr, mg kg ⁻¹	135	243
Cd, mg kg ⁻¹	<0,1	8,0
Ni, mg kg ⁻¹	38	49
Zn, g kg ⁻¹	18,8	20,0
Fe, g kg ⁻¹	15,6	25,2
Al, g kg ⁻¹	21,0	20,5
Pb, mg kg ⁻¹	189	230

⁽¹⁾ Determinados de acordo com EPA (1986)

Tabela 6 - Tratamentos do experimento com soqueiras de cana-de-açúcar

Tratamento	Componentes
T1	Controle
T2	Adubação mineral (120 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O)
T3	LE _{ISA} ¹ + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T4	LE _{IS60A} + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T5	LE _{ISA} + 60 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T6	LE _{IS60A} + 60 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T7	LE _{ISA} + 120 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T8	LE _{IS60A} + 120 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O

⁽¹⁾ 14 t ha⁻¹ no 1º ano agrícola e 16 t ha⁻¹ no 2º ano agrícola; TMN = 28%, o que equivale a 120 kg ha⁻¹ de N
ISA = Incorporação no solo após aplicação; IS60A = incorporação no solo 60 dias após a aplicação

A incorporação do lodo de esgoto em dois períodos, logo após a aplicação e depois de 60 dias teve o intuito de verificar a interferência de um período desfavorável ao trabalho mecanizado no solo, seja por excesso ou falta de chuvas, que impedisse a incorporação do LE no

solo. A dose de lodo de esgoto foi calculada para fornecer o equivalente a 120 kg ha⁻¹ de N seguindo a recomendação de adubação para a cultura (Raij et al. 1997) e foi determinada em função do conteúdo de N disponível no resíduo (N_{LE}) e da taxa de mineralização do nitrogênio (TMN).

$$\text{Dose de N} = \text{Necessidade de N pela cultura} / (\text{TMN} \times \text{N}_{\text{LE}})$$

Assim, considerando uma taxa de mineralização do N de 28% (estimada em experimento prévio realizado no Laboratório de Química Ambiental, ESALQ/USP) as doses de lodo de esgoto foram calculadas em 14 e 16 t ha⁻¹ (com base no material seco) para os anos agrícolas de 2002/03 e 2003/04, respectivamente. As fontes minerais de N e K foram nitrato de amônio (32% N) e cloreto de potássio (58% K₂O) na forma de adubos comerciais.

2.2.2.4 Instalação e condução do experimento

O manejo inicial das soqueiras foi realizado no dia 16/10/2002 com aplicação de 14 t ha⁻¹ (base seca) de lodo de esgoto e adubação, nos tratamentos correspondentes, na entrelinha das plantas. Nos tratamentos 2, 3, 5 e 7 os componentes foram aplicados nas entrelinhas das plantas e incorporados a uma profundidade de aproximadamente 10 cm com auxílio do cultivador.

Nos tratamentos 4, 6 e 8 os componentes também foram aplicados na superfície do solo nas entrelinhas da cultura. Nestes tratamentos o adubo nitrogenado foi aplicado 60 dias após a adição do resíduo, momento no qual, também foi realizada a incorporação do lodo no solo. A colheita da safra 2002/03 foi realizada em 27/08/2003. Para a safra 2003/2004 as soqueiras receberam os tratamentos em 27/10/2003. O lodo de esgoto foi aplicado em quantidade de 16 t ha⁻¹, N e K na mesma dose aplicada na safra anterior. As aplicações de lodo de esgoto e dos adubos nitrogenado e potássico seguiram o mesmo esquema descrito para a safra anterior. A colheita dessa safra foi realizada em 27/10/2004. Maiores detalhes da condução do experimento podem ser melhor visualizados na Figura 2. Em ambas as safras a produção de colmos foi medida por pesagem de todos os colmos produzidos dentro da área útil de cada parcela experimental com auxílio de um dinamômetro acoplado a uma carregadora de cana. A aplicação do LE, a sua incorporação no solo e a pesagem dos colmos na colheita podem ser observadas na Figura 3. Com a produção de cada parcela fez-se uma estimativa da produtividade em toneladas de cana por hectare (TCH).

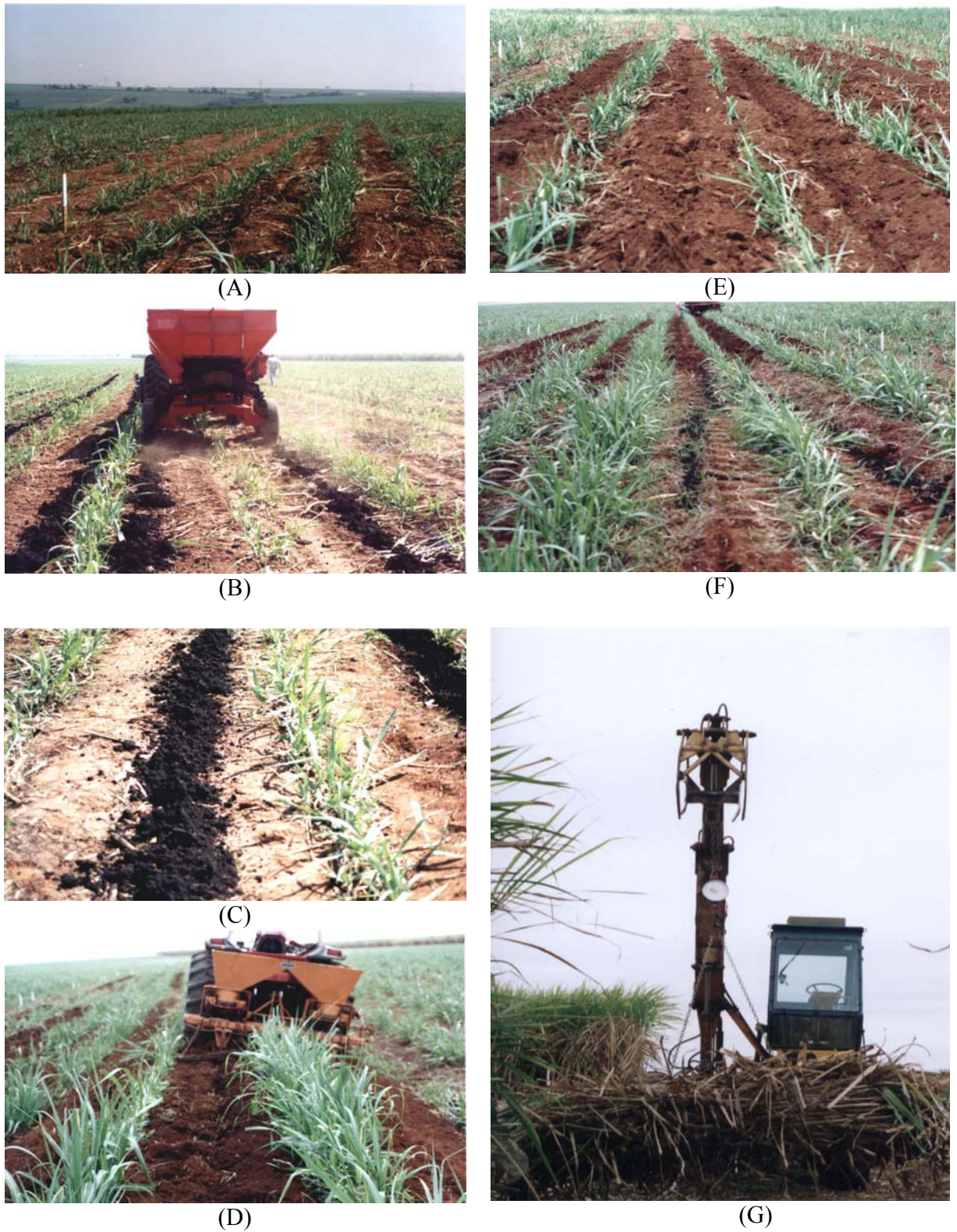


Figura 3 - Visão parcial de uma parcela experimental (A), aplicação do LE (B, C) e incorporação (D, E, F).
Pesagem dos colmos na colheita do experimento (G)

2.2.2.5 Amostragem de solo

Para as análises de fertilidade do solo e quantificação de metais pesados presentes foram coletadas amostras de terra nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m seguindo esquema proposto por Mattiazzo (1982) para solos cultivados com cana-de-açúcar. Dentro da área útil de cada parcela experimental obteve-se uma amostra composta formada por mistura e homogeneização de seis amostras simples, sendo cinco coletadas na entrelinha e uma na linha de cultivo.

Após a coleta, as amostras compostas de terra foram divididas em duas porções. Uma foi congelada a 20°C negativos para as quantificações de N-inorgânico (NO_3^- e NH_4^+) enquanto a outra foi seca ao ar, destorroada, passada em peneira de 2 mm de malha resultando na chamada “terra fina seca ao ar” (TFSA) e reservada para as análises dos atributos químicos de fertilidade do solo, segundo metodologia de Raij et al. (2001). A condutividade do solo foi medida numa suspensão de solo:água (1:1) à temperatura ambiente.

2.2.2.6 Extração e quantificação de nitrogênio (N-total e N-inorgânico) em solos

A determinação dos teores de N-total no solo foi realizada conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A extração e quantificação do N-inorgânico foi realizada segundo metodologia descrita por Mulvaney (1996). O teor de N-inorgânico foi determinado pela soma dos teores de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ e o teor de N-orgânico foi determinado por diferença entre o N-total e N-inorgânico.

2.2.2.7 Determinação da CTC

A CTC efetiva ao pH natural do solo (CTC_e) foi determinada segundo a metodologia proposta por Gillman; Sumpter (1986). A determinação da CTC a pH 7 (CTC_7) foi realizada de acordo com metodologia adaptada de Glória et al. (1965). A CTC calculada (CTC_c) foi estimada pelo somatório de cátions trocáveis. Foram utilizadas amostras da camada de 0-0,2 m de profundidade por se entender que esta seria mais alterada em função da aplicação do LE.

As quantificações de Mg e Ca foram realizadas por espectrometria de absorção atômica.

2.2.2.8 Extração dos teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo

A quantificação dos teores totais de metais pesados nas amostras de terra foi realizada empregando a metodologia descrita por Sastre et al. (1999) para uso em estudos ambientais. As

amostras de TFSA foram trituradas em almofariz, pesou-se 1,0 g de amostra e esta foi deixada em pré-digestão em temperatura ambiente por 16 horas com 10 mL de *aqua-regia* (3 HCl: 1 HNO₃). As amostras foram, então, digeridas a 95° C por 2 horas sob refluxo. As amostras foram filtradas e o volume foi acertado para 50 mL, em balão volumétrico, com solução de HNO₃ 0,5 mol L⁻¹. A quantificação dos teores de Cd, Cr, Ni e Pb nos extratos foi realizada por ICP-AES.

2.2.2.9 Extração de Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis no solo

Os teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn foram avaliados com o extrator DTPA pH 7,3 de acordo com a metodologia proposta por Abreu e Andrade (2001) A quantificação desses metais foi realizada por ICP-AES. Foram utilizadas amostras da camada de 0-0,2 m de profundidade por se entender que esta seria mais alterada em função da aplicação do LE.

2.2.2.10 Amostragem e análise do tecido foliar

Para avaliar a nutrição das plantas foram coletadas 15 folhas +1 – TVD, segundo sistema de ordenação de Kuijper (Clements, 1980), das plantas dentro da área útil de cada parcela preservando os 20 cm centrais de cada folha e descartando-se a nervura central (Raij et al. 1997). Foram realizadas duas amostragens por safra: aos 4,5 meses de idade e no dia da colheita. As folhas coletadas após convenientemente lavadas foram secas em estufa de circulação forçada de ar à 65° C por 72 horas e moídas em moinho tipo Wiley para a realização das análises químicas.

Para as quantificações de N no tecido foliar foi utilizada a metodologia proposta por (SILVA, 1999). Para as determinações dos demais nutrientes e metais pesados foi utilizada a metodologia de Abreu (1997) com digestão em sistema fechado assistido por forno de microondas conforme programa constante do apêndice B.

2.2.2.11 Parâmetros tecnológicos do caldo

Para as análises tecnológicas do caldo foram coletados seis colmos dentro da área útil de cada parcela, despalhados, despontados e triturados. Uma sub-amostra de 500 g foi colocada em prensa hidráulica obtendo-se deste modo o caldo extraído (CEX) e o bagaço fibroso, de acordo com metodologia de Sturion; Fernandes (1979).

A partir do CEx foram determinados os seguintes parâmetros tecnológicos de acordo com César; Silva (1993):

- a. Sólidos Solúveis Totais (Brix % CEx), por leitura direta de uma alíquota do CE em refratômetro.
- b. Pol % CEx, por leitura em sacarímetro sem diluição do caldo.
- c. Pureza do CEx (PZA)

$$PZA = [(Pol \% CE)/(Brix \% CE)] \times 100 \quad (1)$$

- d. Peso úmido do bagaço fibroso (PUBF)
- e. Peso seco do bagaço fibroso (PSBF), após secagem em estufa de circulação forçada de ar a 100°-105°C
- f. Açúcares redutores % CEx (AR % CEx)

$$AR \% CEx = 3,6410 - 0,0343 \times PZA \quad (2)$$

- g. Porcentagem de fibra da cana (Fibra % cana)

$$Fibra \% cana = 0,08 \times PUBF - 0,8760 \quad (3)$$

- h. Pol % da cana (PCC)

$$PCC = Pol \% CEx \times (1 - 0,01 \times Fibra \% cana) \times C \quad (4)$$

- i. Açúcares redutores % cana (AR % cana)

$$AR \% cana = AR \% CEx \times (1 - 0,01 \times Fibra \% cana) \times C \quad (5)$$

onde $C = 1,0313 - 0,00575 \times Fibra \% cana$, nos itens 4 e 5.

- j. Açúcar Total Recuperável (ATR), em quilogramas de açúcar t⁻¹ cana, segundo a fórmula da Consecana (1999) para pagamento da cana pelo teor de sacarose (PCTS):

$$ATR = 9,26288 \times Pol\ cana + 8,8 \times AR \% cana \quad (6)$$

- k. Toneladas de Açúcar por hectare (TAH)

$$TAH = ATR \times TCH/1000 \quad (7)$$

Os teores de Ca, Mg, P, K, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Ni e Pb no caldo foram determinados em uma alíquota de amostra após digestão via seco de acordo com metodologia adaptada de Bataglia et al. (1978). Para tanto, 50 mL do caldo foram pré-concentrados em cadinhos de porcelana até a eliminação total de água e o resíduo restante foi incinerado a 500° C por duas horas em mufla elétrica com posterior solubilização das cinzas com HCl 6 mol L⁻¹.

O teor de N-inorgânico no caldo foi determinado a sem prévia destruição da matéria orgânica, conforme a metodologia adaptada de Beauclair (1994). Neste caso a quantificação do teor de N foi realizada destilando-se, por cinco minutos, 20 mL de caldo na presença de 0,2 g de MgO e 0,2 g de liga de Devarda. A quantificação do N foi realizada de maneira semelhante à descrita para o N-inorgânico do solo, ou seja, por destilação com vapor de arraste.

Os teores de potássio (solo, folhas e caldo) foram determinados por fotometria de chama. O fósforo (solo, folha e caldo) foi determinado por colorimetria (MURPHY; RILLEY, 1962). Para os analitos quantificados por espectrometria de absorção atômica acoplada ao plasma (ICP-AES) as linhas espectrais empregadas são mostradas no apêndice C.

2.2.2.12 Tratamento estatístico dos dados

O efeito dos tratamentos sobre as variáveis de interesse foi avaliado pelo teste F (ANOVA) de acordo com o esquema da Tabela 7.

Tabela 7 - Esquema da análise de variância constituído de fatorial 3 x 2 + 2 fatores adicionais em delineamento em blocos casualizados

Causa da Variação	G.L.
Trat. Adicionais vs. Fatorial	1
Ad. Mineral vs. Controle	1
Doses de N (N)	2
Época de Incorporação do LE (I)	1
Fatorial N x. I (Tratamentos)	2 (7)
Bloco	3
Resíduo	21
Total	31

A comparação das médias das doses de N, épocas de incorporação, controle vs adubação mineral e tratamentos adicionais vs fatorial foi realizada pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$) com auxílio do programa ESTAT v.2 desenvolvido pela FCAV/UNESP, Jaboticabal (SP) na sub-rotina: “*Fatorial com 2 fatores mais testemunhas – DIC/DBC*”.

2.2.3 Resultados e Discussão

Convém fazer uma breve abordagem quanto ao aporte no solo dos nutrientes, carbono e metais pesados na dose de lodo de esgoto aplicada (Tabela 8).

A aplicação do LE resultou num aporte anual médio de 420 kg ha⁻¹ de N-total, dos quais apenas 10 kg ha⁻¹ (cerca de 2%) estavam na forma inorgânica e prontamente assimilável pelas plantas. Dos demais macronutrientes verificou-se que os maiores aportes foram, em ordem decrescente, cálcio>fósforo>magnésio=potássio. Especificamente para o fósforo, a quantidade adicionada ao solo (média de 113 kg ha⁻¹ de P) equivale a cerca de 260 kg ha⁻¹ de P₂O₅ que corresponde a quase 10 vezes a dose recomendada (30 kg ha⁻¹) para soqueiras de acordo com Raij et al. (1997).

Tabela 8 - Aporte de alguns nutrientes, carbono orgânico e metais pesados com a aplicação de 14 e 16 t ha⁻¹ de LE, respectivamente nos anos agrícolas de 2002/03 e 2003/04, num Argissolo Vermelho distrófico cultivado com cana de açúcar (RB855536)

	2002/03	2002/04	Acumulado 2002/2004
	-----kg ha ⁻¹ -----		
N total	417	430	848
N inorgânico	10	11	21
P-total	97	130	227
K-total	30	18	48
Ca-total	145	197	342
Mg-total	36	26	62
Na-total	0,00	21	21
C-orgânico	4772	4707	9479
Cu-total	12	13	25
Fe-total	218	403	621
Mn-total	9	12	21
Zn-total	26	32	58
Cd-total	0,0	0,1	0,1
Cr-total	2	4	6
Ni-total	0,5	0,8	1,3
Pb-total	3	4	7

Com relação ao Cu, Fe, Mn e Zn observou-se que o Fe foi o elemento adicionado em maior quantidade seguido do Zn, Cu e Mn. Considerando a recomendação de Raij et al. (1997) para aplicação de doses de Cu e Zn, iguais a 4 e 5 kg ha⁻¹ respectivamente, em solos cultivados com cana-de-açúcar e deficientes nesses nutrientes verifica-se que o lodo de esgoto pode ser considerado uma fonte alternativa de micronutrientes.

O lodo de esgoto adicionou ao solo aproximadamente 5 t ha^{-1} de carbono orgânico em cada ciclo da cultura e cerca de 400 kg ha^{-1} de N, o que corresponde a aproximadamente 4 vezes a demanda da cultura.

2.2.3.1 Fertilidade do solo

Os dados sobre alguns atributos referentes à fertilidade do solo em amostras coletadas nas profundidades de 0-0,2 e a 0,2-0,4 m podem ser observados nos ANEXOS A e B, respectivamente. A seguir serão comentados os principais efeitos dos tratamentos sobre alguns desses atributos.

2.2.3.1.1 pH do solo

Foram observados efeitos dos tratamentos nos valores de pH apenas no segundo ano (2003/04) e na camada de 0-0,2 m. Verificou-se diferença significativa entre os tratamentos adicionais (Controle e AM) e o Fatorial a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Houve também efeito significativo das doses de fertilizante nitrogenado e neste sentido com o aumento das doses de N houve redução no pH.

A aplicação do LE sem N adicional não causou redução do pH quando comparado ao tratamento controle, e esse valor, todavia, foi superior ao observado para o tratamento AM. Considerando que AM recebeu 120 kg ha^{-1} de N como nitrato de amônio verifica-se que o adubo reduziu o pH de maneira mais acentuada que o LE sem N (Figura 4). Deve-se considerar ainda que, apesar de significativa estatisticamente, a diferença de 0,1 a 0,2 unidades de pH verificada neste experimento tem pouco efeito agrônômico nas culturas.

Alguns trabalhos científicos têm demonstrado que as alterações no pH do solo, causadas pela incorporação de LE no solo, estão diretamente relacionadas ao tipo de tratamento recebido pelo resíduo. Assim, apenas os lodos alcalinos tendem a elevar o pH do solo, independentemente da natureza e das transformações da fração orgânica desses materiais (OLIVEIRA et al., 1995; PIRES, 1998; REIS, 1998; BERTONCINI; MATTIAZZO, 1999; ANJOS; MATTIAZZO, 2000; OLIVEIRA et al., 2002).

Neste experimento foi utilizado um resíduo condicionado com polieletrólito que apresentava pH em torno de 6 (Tabela 5) e não eram esperados efeitos corretivos da reação do solo. Isto está de acordo com os resultados de Simonete et al. (2003) que aplicando um lodo de esgoto digerido e anaeróbico num Argissolo verificaram redução do pH de 5,1 para 4,7 com a

dose de 30 t ha⁻¹ e atribuíram esse efeito a várias causas possíveis: nitrificação do N amoniacal do LE, oxidação de sulfitos e produção de ácidos orgânicos.

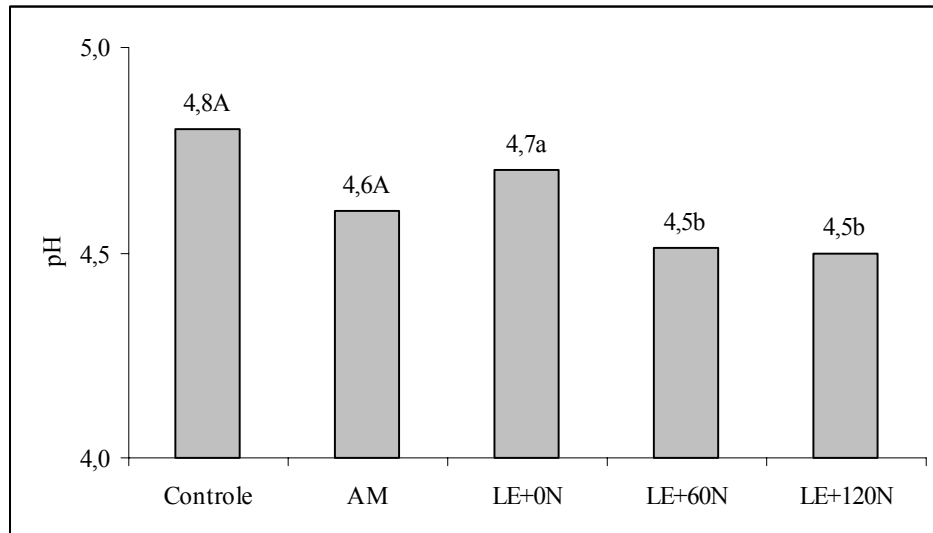


Figura 4 - Efeito dos tratamentos nos valores de pH do solo PVd, camada de 0-0,2 m, ano agrícola 2003/04. Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para o contraste entre controle vs. AM e minúsculas para as doses de N não diferem entre si (Tukey a 5%)

Galdos et al. (2004) trabalhando com milho cultivado num Latossolo Vermelho eutroférico tratado, por dois anos, com lodo de esgoto de mesma origem que o utilizado neste experimento, porém em dose até 33% maior, relataram efeitos acidificantes do resíduo. Segundo os autores, em comparação à adubação química a aplicação de 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ de LE reduziu o pH da camada de 0-0,05 m de 5,8 para 5,0 mas apenas no segundo ano e com a reaplicação do resíduo. Nas demais profundidades não houve alterações nos valores do pH.

A pequena variação no pH pode ser resultado tanto da dose utilizada como da amostragem do solo que foi realizada nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m que são as normalmente avaliadas quando da análise de fertilidade do solo para as condições comerciais de cultivo.

Com relação ao efeito da aplicação do fertilizante nitrogenado no pH deve-se considerar que as reações de nitrificação resultam em liberação de H⁺ na proporção de 1 mol de NH₄⁺: 4 mol de H⁺. Assim, a aplicação de fertilizante nitrogenado mineral juntamente com o lodo de

esgoto pode ter potencializado esse efeito uma vez que ambos são fontes de N-NH_4^+ como também foi postulado por Simonete et al. (2003).

Neste estudo os valores de pH estiveram na faixa de 4,4 a 4,8, valores esses, que caracterizam a acidez como elevada de acordo com o critério de Raij et al. (1997). O índice de saturação por bases (dados não apresentados), esteve ao redor de 47% na safra 2002/03 e reduziu para um valor médio de cerca de 39% na safra 2003/04.

Não houve efeito significativo dos tratamentos no V% indicando que o aporte de cátions trocáveis, via LE, não acarretou acúmulo desses elementos no solo ou estes foram perdidos do sistema seja por absorção pelas plantas ou por lixiviação.

2.2.3.1.2 Conteúdo de carbono orgânico do solo

Alterações no conteúdo de carbono orgânico no solo foram observadas apenas na camada 0-0,2 m nos dois anos avaliados (Figura 5). Não houve incrementos nos teores de carbono orgânico na camada mais profunda (0,2-0,4 m) provavelmente devido à profundidade de incorporação do resíduo, de cerca de 0,1 m. Como as médias entre anos não foram testadas, não foi possível verificar a significância das alterações nos teores de C com o tempo e a discussão dos dados está restrita ao efeito dos tratamentos dentro de cada ano agrícola.

Pode-se verificar que a aplicação de LE, em 2002/03, praticamente em nada influenciou os resultados com as médias dos tratamentos T3 e T4 (LE+0N) similares às observadas para os tratamentos controle e AM.

No segundo ano, contudo, as médias desses tratamentos (T3 e T4) foram maiores que a do tratamento AM indicando efeito positivo da reaplicação do LE no conteúdo de carbono do solo com aumento de 2 g kg^{-1} de C do tratamento AM para os tratamentos LE +0N.

Outros autores também observaram aumentos nos teores de C-orgânico após a aplicação de LE no solo (OLIVEIRA et al. 2002; SIMONETE et al. 2003; GALDOS et al. 2004; NASCIMENTO et al. 2004). No trabalho de Oliveira et al. (2002), entretanto, foram utilizadas doses anuais de LE de 2 a 7 vezes maiores que as utilizadas neste experimento e de acordo com Wong et al., (1998) sabe-se que aportes de carbono que suplantam a capacidade microbiana de degradação conduzem à um decréscimo na taxa de degradação e conseqüente acúmulo de carbono orgânico no solo.

Galdos et al. (2004), em experimento a campo, e Nascimento et al. (2004), em experimento em vasos e em casa de vegetação, também verificaram aumentos nos teores de

carbono orgânico no solo com aplicação de LE. Os primeiros verificaram aumentos de 5 g dm^{-3} de C-orgânico na camada de 0-0,05 m de um Latossolo Vermelho tratado com 10 t ha^{-1} de LE em comparação ao tratamento que não recebeu o resíduo. Nascimento et al. (2004) relataram aumentos médios de 2 g kg^{-1} nos teores de C de um Espodosolo e de um Argissolo tratados com 20 t ha^{-1} de LE.

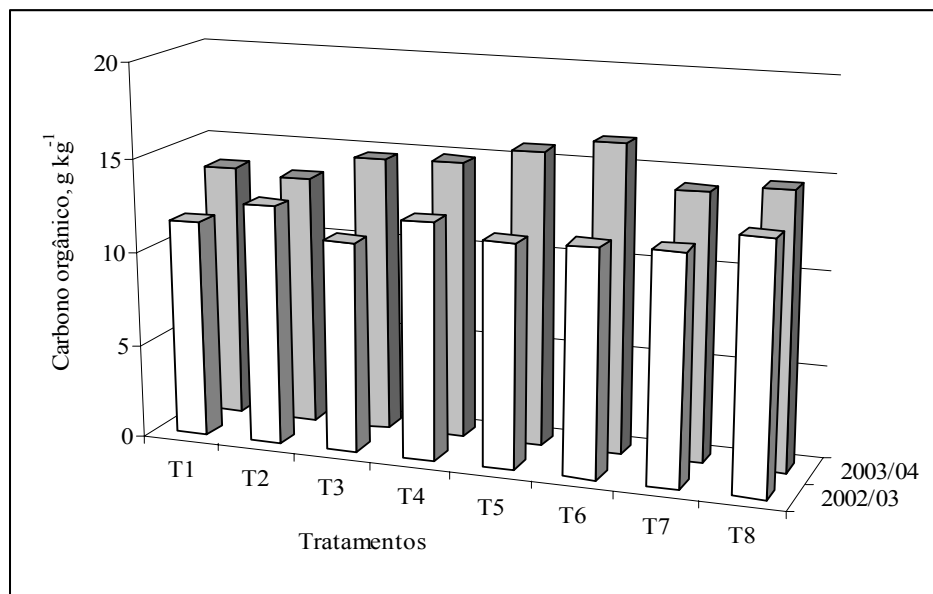


Figura 5 - Carbono orgânico na camada de 0-0,2 m nos anos agrícolas de 2002/03 e 2003/04. T1 = Controle; T2 = AM; T3 = LE+0N_{ISA}; T4 = LE+0N_{ISA60A}; T5 = LE+60N_{ISA}; T6 = LE+60N_{ISA60A}; T7 = LE+120N_{ISA}; T8 = LE +120N_{ISA60A}

Os aumentos nos teores de carbono orgânico nos solos podem ser benéficos para a manutenção da fertilidade dos mesmos. Há de se considerar, entretanto, que a qualidade do carbono que permanece no solo após aplicação do resíduo pode ser mais importante que o simples incremento de seus teores. Os trabalhos de Bertoncini (2000) e Andrade (2004) demonstraram que o carbono de solos tratados com lodo de esgoto caracteriza-se principalmente de compostos recalcitrantes já bastante degradados em termos do conteúdo de carbono lábil e desse modo muito estáveis.

Os efeitos do LE nos teores de C do solo são controversos, pois resultados apresentados por Silva (1995) e por Marques (1996) não evidenciaram aumentos na quantidade de C-orgânico mesmo aplicando doses elevadas de resíduo. Isso se deve a taxa de degradação dos resíduos no solo que segundo Andrade (2004) está associada à intensidade dos processos biológicos para a

estabilização da matéria orgânica, à que são submetidos os resíduos nas estações de tratamento de esgotos além de diferenças na composição da fração orgânica dos mesmos. O autor verificou que o LE proveniente de Jundiá apresentava uma taxa de degradação menor em comparação ao de Barueri fato esse que pode explicar as diferenças verificadas para os trabalhos acima citados.

Resultados apresentados por Oliveira et al. (2002) demonstraram, por sua vez, que aplicações de lodo de esgoto (33; 66 e 99 t ha⁻¹ de LE) promoveram incrementos no teor de carbono orgânico de um Latossolo, proporcionais às doses aplicadas ao final de um ano agrícola.

Trabalhando com solos tratados com três doses de composto de lodo de esgoto (6,6, 19,7 e 59 t ha⁻¹), Korboulewsky et al. (2002) relataram aumentos nos teores de carbono dois meses após a aplicação do resíduo. Esse efeito durou até os 18 meses momento a partir do qual os teores de C estabilizaram nos mesmos patamares em todos os tratamentos independentemente das doses inicialmente aplicadas. Neste sentido os dados aqui apresentados podem não representar um estado de equilíbrio dinâmico do C no solo, com a estabilização dos seus teores, como comentado por Korboulewsky et al. (2002), pois as amostragens foram realizadas aos 12 meses após a aplicação do resíduo.

A causa dessa inconsistência nos resultados para o teor de C pode estar relacionada à natureza diversa dos componentes orgânicos do LE e seus efeitos na atividade da microbiota do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002) e bastante influenciada pelas condições ambientais principalmente temperatura e umidade.

No presente experimento também foi verificado em 2003/04, na camada de 0-0,2 m, efeito das doses de N mineral nos teores de carbono do solo. Uma possível explicação para esse fato decorre de que neste ano (2003/04) houve maior volume de chuvas que associado ao fornecimento de nitrogênio possibilitou uma maior atividade metabólica da planta resultando numa maior produção de raízes e liberação de exsudatos radiculares que contribuíram para elevar o conteúdo de carbono no solo.

2.2.3.1.3 Condutividade elétrica

Os efeitos da aplicação de LE + N nos valores da condutividade elétrica (CE) do solo PVd podem ser observados na Figura 6. De uma maneira geral houve aumentos nos valores deste atributo tanto na camada de 0-0,2 quanto na de 0,2-0,4 m.

Aumentos na CE de solos tratados com lodo de esgoto também foram observados por Epstein et al. (1976), Anjos; Mattiazzo (2000) e Oliveira et al. (2002). Epstein et al. (1976)

atribuíram os aumentos na CE de solos tratados com LE à elevada concentração de íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- presentes na camada de incorporação do resíduo.

Trabalhando com dois solos (Latossolo Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho distrófico), em vasos, tratados com lodo de esgoto (dose equivalente a 388 t ha^{-1}) Anjos; Mattiazzo (2000) encontraram correlações lineares positivas entre a CE e os teores disponíveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Oliveira et al. (2002) observaram aumentos na CE de um Latossolo Vermelho tratado com LE e relataram também que em sete épocas diferentes de amostragem houve uma tendência significativa de redução nos seus valores à medida que aumentava o tempo de incorporação, segundo os autores em função da lixiviação de íons.

Os aumentos observados na CE nos tratamentos com LE, entretanto, não atingiram valores para os quais um solo é considerado salino que, segundo Richards apud Porta et al. (2003) é igual a 4 dS m^{-1} .

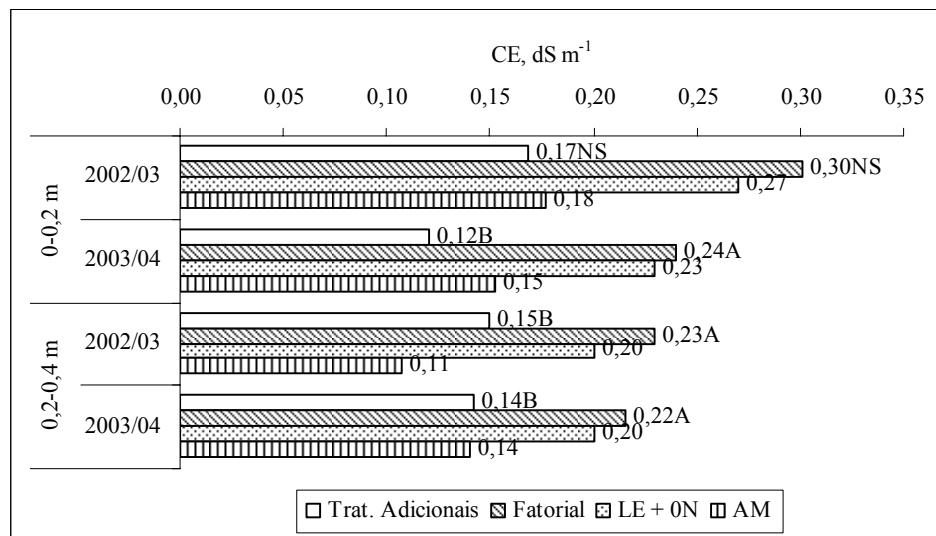


Figura 6 - Condutividade elétrica do solo. Barras horizontais seguidas de mesma letra, para cada profundidade e ano agrícola, não diferem entre si (Tukey a 5%)

Neste trabalho a condutividade elétrica do solo nos tratamentos Controle e AM ficou em torno de $0,15 \text{ dS m}^{-1}$ muito abaixo, portanto, do valor crítico para classificar os solos como salinos. Deve-se ressaltar, entretanto, que o valor de referência foi estabelecido em determinações da CE em extrato de saturação não constituindo uma indicação segura quanto a salinização quando comparado a valores obtidos por outros métodos como o empregado neste

estudo. Apesar disso, esse valor serve como um parâmetro para avaliar a qualidade do solo e foi utilizado com esse intuito.

Como se observa na Figura 6, a aplicação do LE, na camada de 0-0,2 m, praticamente dobrou os valores de CE em comparação à média dos tratamentos adicionais (Controle e AM) muito embora não tenham sido observados efeitos cumulativos com a reaplicação do LE em 2003.

2.2.3.1.4 Teores disponíveis de macro e micronutrientes no solo

Com relação aos demais atributos da fertilidade do solo, os dados referentes aos teores de P, K, Ca e Mg podem ser observados nos ANEXOS A e B para as amostras coletadas nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente. Os efeitos dos tratamentos nos teores disponíveis de micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) estão no ANEXO C.

Analisando o contraste entre a média dos Fatores Adicionais vs média do Fatorial (N x I), observa-se que houve efeitos significativos da aplicação de LE nos teores de Ca no segundo ano agrícola para a profundidade de 0,2-0,4 m (ANEXO B). Dos macronutrientes acima citados o cálcio foi aquele adicionado em maior quantidade, 342 kg ha^{-1} . Para os teores de P, K e Mg não foi observado efeito significativo da aplicação do resíduo.

Esse resultado surpreende especialmente com relação aos teores de P e Mg uma vez a aplicação de lodo de esgoto adicionou ao solo, em termos totais e nas duas safras 227 e 62 kg ha^{-1} , respectivamente de fósforo e magnésio. A discussão sobre os teores de K fica prejudicada uma vez que os tratamentos de T2 a T8 receberam, cada um, 150 kg ha^{-1} de K_2O e a adição do elemento via LE foi baixa, numa média de 24 kg ha^{-1} de K.

Ao contrario do observado no presente trabalho Silva et al. (1998) relataram aumentos nos teores de P e Ca com a aplicação de doses de LE (0 , 15 e 30 t ha^{-1}) numa Terra Roxa Estruturada que podem ser explicados em razão do tipo de LE utilizado no estudo, um lodo alcalino com pH $10,2$ e que também corrigiu a acidez do solo. Simonete et al. (2003) aplicando dose de LE igual a 40 t ha^{-1} de um lodo de esgoto (6 g kg^{-1} de P total) também verificaram aumentos nos teores disponíveis de P, sem característica alcalinizante, num Argissolo. Neste caso, entretanto, deve-se levar em consideração o fato de que a dose aplicada por esses autores, num único ano, foi 20% maior que o total acumulado em dois anos de aplicação neste experimento.

Em ambos os casos houve efeitos diretos e indiretos do LE. No trabalho de Silva et al. (1998) o LE causou aumento no pH do solo o que pode ter resultado numa maior solubilidade de compostos de fósforo associados ao ferro e ao alumínio aumentando a sua disponibilidade (RAIJ, 1991). Além disso, o efeito do pH pode ter contribuído num aumento da CTC do solo, fato esse comum em solos com cargas dependentes de pH (TAN, 1992) e também verificado por outros autores em solos tratados com lodo de esgoto (OLIVEIRA et al. 2002; ANDRADE, 2004) o que ocasionaria maior retenção de cátions trocáveis. O efeito direto do LE nos teores desses macronutrientes, por sua vez, diz respeito ao aporte desses elementos no solo.

No presente estudo, os efeitos do lodo de esgoto no aumento do pH e da CTC não foram observados o que pode ter causado a ausência de efeitos significativos desses atributos.

Os teores disponíveis de Mn e Zn no primeiro ano agrícola (2002/03) e de Fe e Zn no segundo ano agrícola (2003/04) evidenciaram diferenças significativas entre os tratamentos adicionais em comparação ao tratamento fatorial com maiores valores observados para o ultimo. Em virtude do esquema de análise estatística adotado não foi possível isolar o efeito do LE em comparação à AM. Os aumentos verificados nos teores de Mn, Fe e Zn podem ser devidos tanto ao aporte desses elementos via lodo de esgoto quanto à redução do pH promovida pela aplicação de fertilizantes nitrogenados ou mesmo de ambos.

Verifica-se, todavia, que o incremento nos teores desses metais foi muito menor que o total adicionado via LE, indicando que apesar de aumentar os teores disponíveis desses elementos no solo a maior quantidade dos mesmos é transferida para formas pouco disponíveis ou não removidas pelo DTPA.

Isto está de acordo com o verificado por Nascimento et al. (2004) em solos tratados com até 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto. Os autores relataram recuperação de 60 a 32% de Cu, 5 e 3% de Fe, 15 e 30% de Mn e 39 a 37% de Zn adicionados, via resíduo, a dois solos (Espodossolo e Argissolo), pelo DTPA.

2.2.3.1.5 CTC do solo

Os efeitos dos tratamentos na CTC, calculada, efetiva e a pH 7, podem ser observados no ANEXO D. Em razão do esquema de análise estatística adotado não foi possível comparar diretamente as médias dos tratamentos com LE e AM.

Os resultados obtidos, todavia, mostram que para a CTC calculada (CTCc) não houve efeitos significativos dos tratamentos nem do contraste entre Tratamentos Adicionais vs Fatorial que poderia evidenciar algum efeito do LE.

Assim como já relatado para os teores de Ca e Mg trocáveis no solo, esse resultado da CTC calculada demonstra que a dose de lodo de esgoto aplicada não foi suficiente para aumentar a disponibilidade desses elementos no solo que refletiriam em aumentos na CTCc tanto em função do aporte dos mesmos ao solo como também em função do pH observado. Os valores de pH ao final das duas safras foram baixos indicando que a geração de cargas de superfície dependentes da reação do solo foi inexpressiva e que o aporte de cálcio e magnésio ao solo não causou diferenças tais na CTCc que pudessem ser consideradas estatisticamente significativas.

Para os dados de CTC efetiva (CTCe) e CTC a pH 7 (CTC7) verificou-se efeitos significativos dos tratamentos com a reaplicação do resíduo em 2003/04. Para a CTCe verificou-se diferença significativa entre os tratamentos adicionais e o fatorial o que pode indicar a participação do LE no aumento desse atributo. Esse resultado vai contra o verificado por Bertoncini (2000) e Oliveira et al. (2002) que demonstraram que, para solos com cargas dependentes do pH, muito comuns nas condições edáficas brasileiras, os efeitos da aplicação de LE no solo sobre a capacidade de troca catiônica são devidos às alterações na reação do solo, em função da alcalinidade do resíduo, em detrimento do conteúdo de carbono dada a menor qualidade da matéria orgânica adicionada. Bertoncini (2000) fracionou a matéria orgânica de solos tratados com lodo de esgoto da ETE de Barueri e verificou que os mesmos se constituíam de compostos fenólicos com pKa ao redor de 10, ou seja, pouco contribuíam com cargas dissociadas nos valores de pH dos solos estudados, que estavam em torno de 4,5.

Todavia, como já citado no item 3.1.2, Andrade (2004) verificou diferenças significativas quanto à composição da fração orgânica dos lodos de Barueri, utilizados por Bertoncini (2000) e Oliveira et al. (2002), e o de Jundiaí, utilizado neste experimento o que pode justificar essa discrepância entre os resultados verificados para a CTCe. As médias dos tratamentos LE+0N para a CTC7 também foram maiores que a do tratamento AM, efeito este, que pode estar associado ao incremento de carbono verificado no item 3.1.2.

Convém salientar, entretanto, que Andrade (2004) realizou a caracterização desses compostos orgânicos diretamente em amostras de LE e nesse sentido estudos desse tipo mas

com solos tratados com o resíduo e incubados por diferentes períodos de tempo ajudariam a lançar luz sobre os reais efeitos do LE em alguns atributos do solo como o teor de carbono e a CTC.

2.2.3.1.6 Nitrogênio no solo

O comportamento do N-total no solo pode ser observado na Figura 7. Verifica-se que as maiores alterações no N-total do solo foram verificadas no primeiro ano de aplicação do resíduo e na camada superficial (0-0,2 m). Os teores observados para todos os tratamentos na camada de 0,2-0,4 m foram similares nos dois anos avaliados.

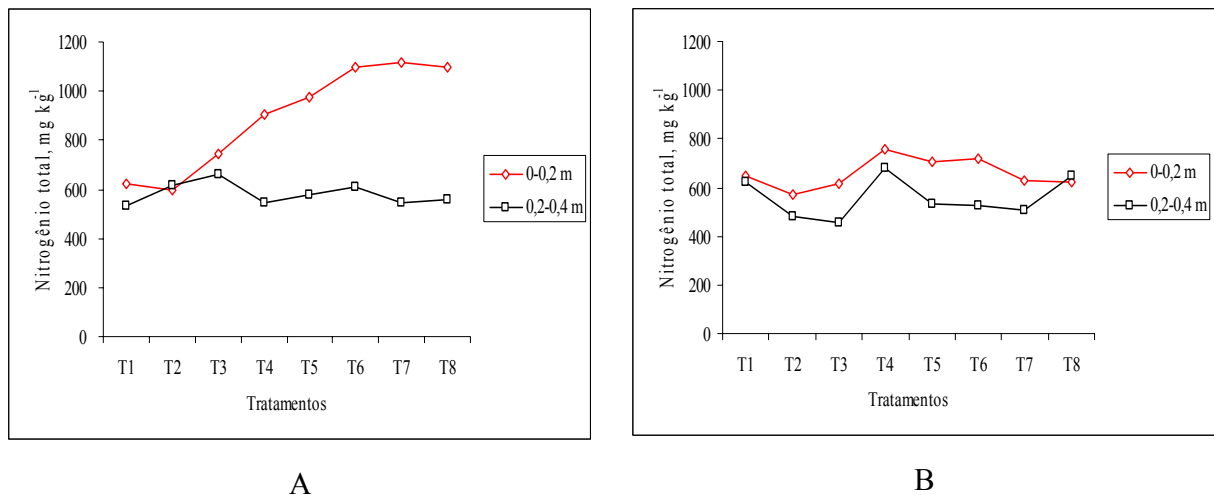


Figura 7 - Efeitos dos tratamentos no conteúdo de nitrogênio total no solo nos anos agrícolas de 2002/03 (A) e 2003/04 (B). T1 = Controle; T2 = AM; T3 = LE+0N_{ISA}; T4 = LE+0N_{IS60A}; T5 = LE+60N_{ISA}; T6 = LE+60N_{IS60A}; T7 = LE+120N_{ISA}; T8 = LE +120N_{IS60A}

Considerando que o N-orgânico representou mais de 96% do teor total optou-se por doravante discutir os dados com ênfase nesta forma do nutriente em detrimento do N-total.

Os dados referentes ao N-orgânico, N-NH₄, N-NO₃, N-inorgânico e relação C/N, suas médias e a ANOVA podem ser observados no ANEXO E.

No ano 2002/03, camada 0-0,2 m, houve efeito significativo das doses de N mineral nos teores de N-orgânico (Figura 8a) e não foram verificados efeitos dos tratamentos para as amostras coletadas na camada de 0,2-0,4 m. Entre as doses de N, contudo não houve diferença entre as

maiores doses, ou seja, a aplicação adicional de 60 ou 120 kg ha⁻¹ de N conjuntamente com o LE resultou em teores semelhantes de N-orgânico.

Em 2003/04 houve efeitos significativos da interação dose de N x época de incorporação (N x I) nas duas profundidades avaliadas (Figuras 8b e 8c). A incorporação do LE 60 dias após sua aplicação no solo resultou nos maiores teores de N-orgânico. Deve-se ressaltar que esse resultado pode ser devido ao fato de que a adubação nitrogenada foi realizada no mesmo dia da incorporação do LE no solo, ou seja, o efeito da época de incorporação nos teores de N disponibilizados pelo resíduo devem ser considerados apenas no tratamento LE+0N no qual se supõem todo N proveniente do LE.

Isto posto, verifica-se que no tratamento LE + 0N, tanto na camada de 0-0,2 m como na de 0,2-0,4 m foi observado o maior teor de N-orgânico. As doses de N mineral aplicadas juntamente com o LE também influenciaram os teores de N-orgânico, após a segunda safra, na camada de 0,2-0,4 m na qual verificou-se uma tendência de aumento com a aplicação do adubo nitrogenado.

Comparando as Figuras 8a e 8b observa-se que os teores de N-orgânico do solo nos tratamentos com N-mineral foram maiores no final da primeira safra (2002/03) do que o verificado para a segunda safra (2003/04). Como as doses de LE e fertilizante foram as mesmas nas duas ocasiões a redução do conteúdo de N-orgânico no segundo ano pode ser atribuída a dois fatores: clima mais favorável à atividade microbiana no solo e adaptação microbiota as novas condições do solo após a aplicação do LE.

Neste sentido, Wiseman; Zibilske (1988) demonstraram que a taxa de mineralização do N-orgânico em solo tratado com lodo de esgoto que já havia recebido o resíduo é maior em decorrência da aclimatação da microbiota do solo ao substrato. Quando foi realizada a suplementação com fertilizante mineral (LE + 60N e LE + 120N) houve aumentos proporcionais nos teores de N-orgânico chegando a dobrar o teor no tratamento LE + 120N.

Por outro lado, Boeira et al. (2002) em um estudo em vasos sob condições controladas também observaram acúmulo de N-orgânico em um Latossolo Vermelho distroférico tratado com lodo de esgoto. Oliveira et al. (2002) também observaram acúmulo de formas orgânicas de N aplicando doses de lodo de esgoto duas, quatro e oito vezes maiores do que as utilizadas neste experimento.

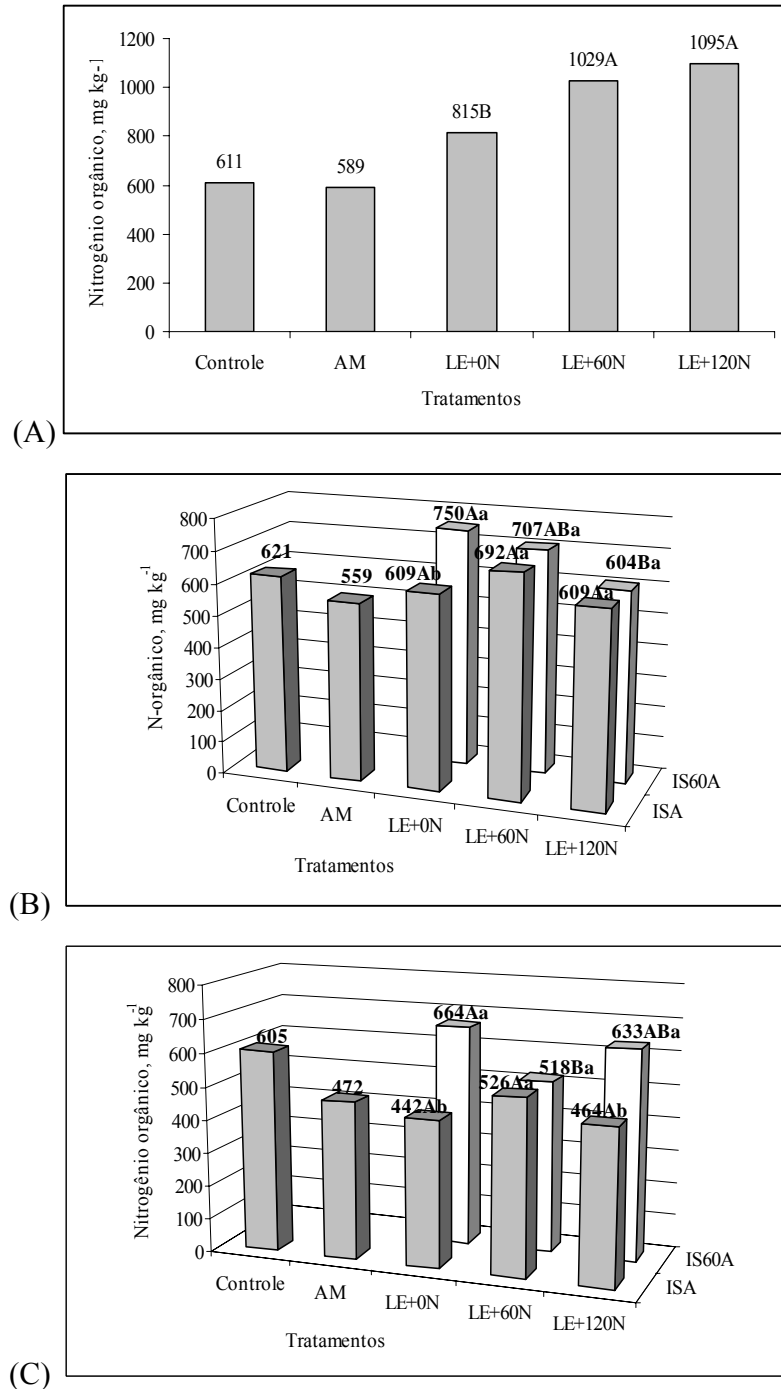


Figura 8 - Efeito de doses de N mineral nos teores de nitrogênio orgânico na camada de 0-0,2 m em 2002/03 (A), efeitos da interação N x I nas camadas de 0-0,2 m (B) e 0,2-0,4 m (C) em 2003/04. Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para as doses de N e minúsculas para as épocas de incorporação, não diferem entre si (Tukey a 5%)

Banarjee et al. (1977) e Aquino Neto (1998) relataram que em incubações prolongadas de solo + lodo de esgoto persistia uma fração do N-orgânico passível de sofrer uma mineralização posterior. Neste caso considera-se que aportes de N acima das reais necessidades da cultura podem resultar em acúmulo de N-orgânico que em certo momento, associado a condições climáticas e biológicas favoráveis, podem ser mineralizadas.

O conteúdo de N-orgânico remanescente após aplicação de lodo de esgoto no solo pode ser considerado um bom estimador da disponibilidade do nutriente em detrimento da mineralização, medida pelos teores de N-inorgânico, uma vez que esta é fortemente influenciada pelas perdas de N por lixivação e desnitrificação (LINDEMANN; CARDENAS, 1984).

Convém salientar, que o teor de N-orgânico no tratamento controle na camada de 0-0,2 m, nas duas safras, foi próximo ao verificado para o tratamento AM, indicando uma elevada disponibilidade natural do nutriente. A aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N via fertilização mineral não causou diferenças significativas na comparação dos teores de N-orgânico entre os tratamentos AM e controle ao final dos dois anos indicando que o aporte adicional de N mineral foi absorvido pelas plantas e/ou removido para camadas mais profundas do solo e não se acumularam.

O conteúdo de N-NO₃⁻ correspondeu a aproximadamente 80% do conteúdo de N-inorgânico total. Verificou-se que houve efeitos das doses de N mineral nos teores de nitrato e amônio nos dois anos e profundidades avaliadas (Figuras 9a e 9b).

Para os teores totais de N-inorgânico (N-NH₄ + N-NO₃) houve efeitos das doses de N mineral em 2002/03, nas amostras de terra coletadas na camada de 0-0,2 m e nas duas profundidades em 2003/04 (Figura 10a). Neste contexto, verifica-se que a aplicação de LE sem suplementação com fertilizante nitrogenado (LE + 0N) proporcionou teores de N-inorgânico superiores aos observados no tratamento AM na camada de 0-0,2 m indicando que a dose do resíduo aplicada foi suficiente para disponibilizar o nutriente em formas assimiláveis pelos vegetais.

Isso pode ser comprovado também se observando a relação C/N do solo nos tratamentos com LE em comparação ao tratamento AM em 2002/03, nos quais o elevado conteúdo de N, em relação ao de C, resultou em condições favoráveis a mineralização da fração orgânica do N (Figura 10b). A aplicação de fertilizante nitrogenado junto com o LE causou aumentos nos teores de N-inorgânico, principalmente nitrato nos dois anos nas profundidades estudadas.

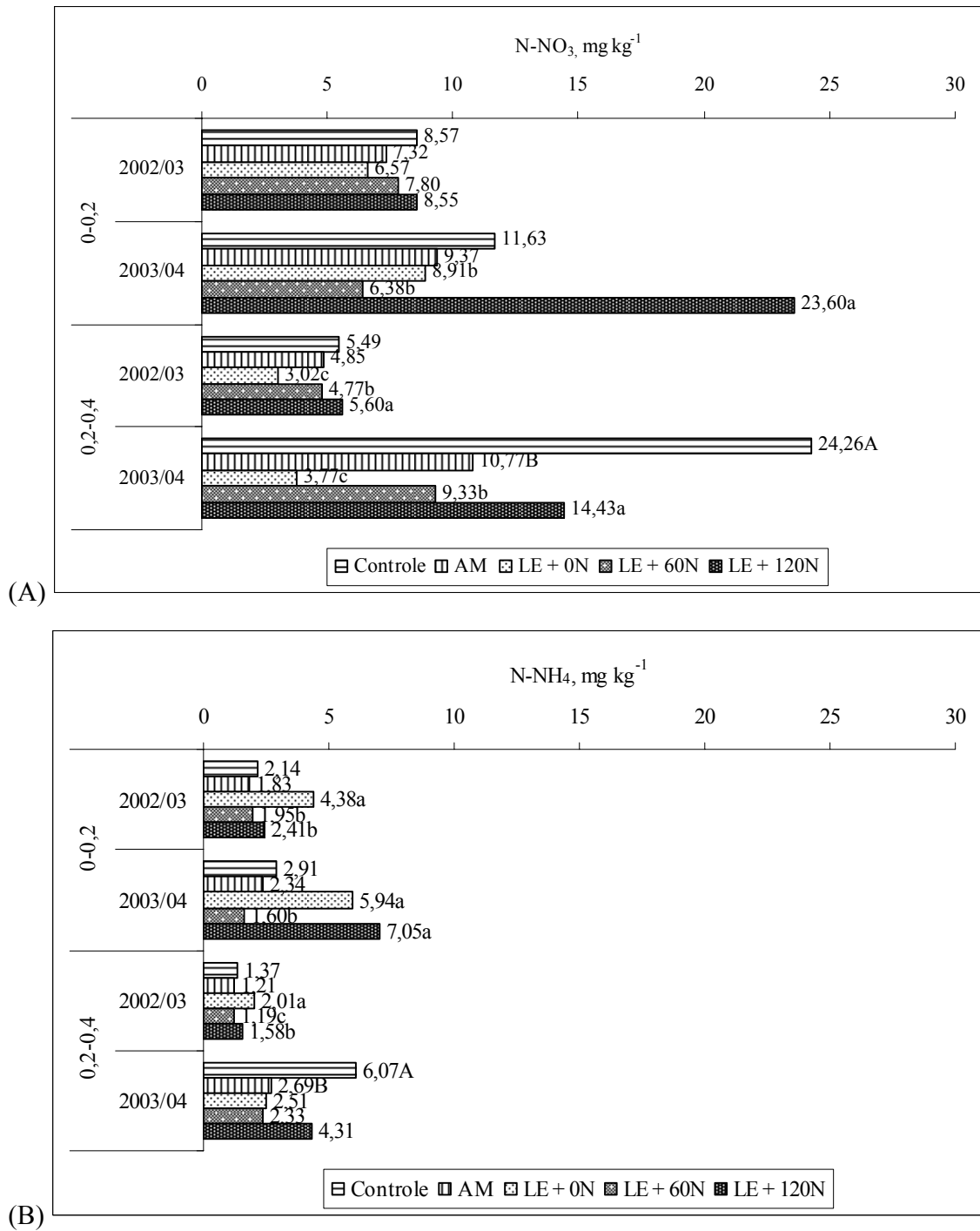


Figura 9 - N-NO₃⁻ (A) e N-NH₄⁺ (B) no solo. Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para o contraste Controle vs AM e minúsculas para as doses de N, dentro de cada ano e profundidade não diferem entre si (Tukey a 5%)

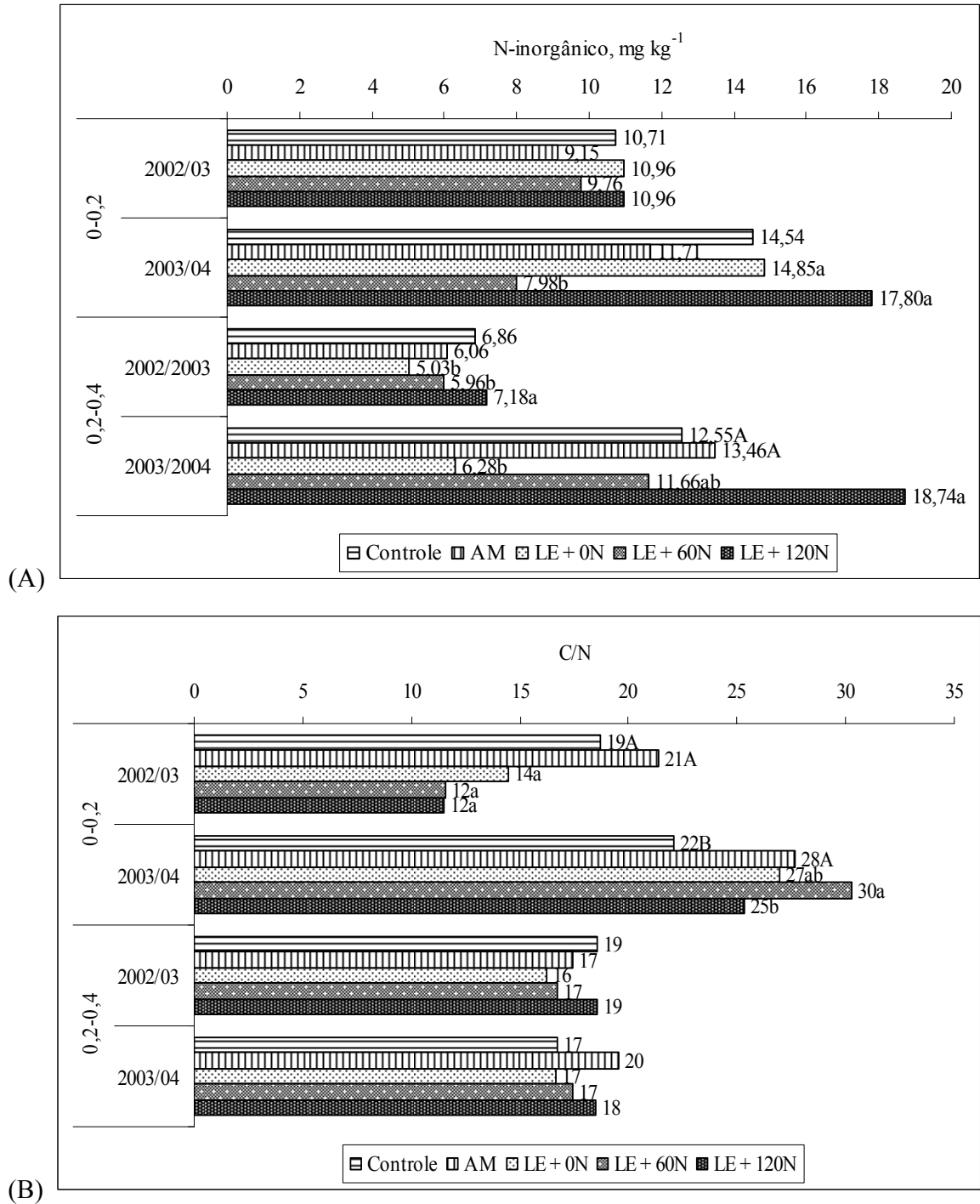


Figura 10 – N-inorgânico (N-NH₄ + N-NO₃) (A) e relação C:N do solo (B). Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para o contraste Controle vs AM e minúsculas para as doses de N, dentro de cada ano e profundidade não diferem entre si (Tukey a 5%)

Apesar disto ocorrer concomitantemente a incrementos nos teores de N-orgânico a imobilização em formas orgânicas não correspondeu, sozinha, a todo aporte de nitrogênio no sistema indicando que, além da absorção pelas plantas, podem ter ocorrido perdas para profundidades maiores.

Isso está de acordo com o verificado por outros autores que evidenciaram a lixiviação de nitrato para camadas mais profundas do solo com a aplicação lodo de esgoto em diferentes doses e solos (KEELING et al., 1977; ANJOS; MATTIAZZO, 2000; OLIVEIRA et al., 2001; VIEIRA; CARDOSO, 2003).

De acordo com Vieira; Cardoso (2003) a aplicação de LE em doses calculadas a partir de taxas de mineralização do N obtidas em condições de laboratório tendem a subestimar a real disponibilização do nutriente em condições de campo.

Deve-se salientar que o estabelecimento de taxas de mineralização do N presente em resíduos orgânicos segue um protocolo analítico regulamentado por órgão fiscalizador (CETESB, 1999) e que o estabelecimento do mesmo em condições de campo para nortear aplicações no futuro é praticamente impossível tendo em vista as interferências do clima e da microbiota do solo. Cabe neste sentido, ressaltar a importância do monitoramento das áreas tratadas com o resíduo como medida para se evitar efeitos deletérios do N no sistema de produção agrícola.

As épocas de incorporação do resíduo e do fertilizante nitrogenado afetaram os teores de N-inorgânico apenas na reaplicação (2003/04) da maior dose de N (120 kg ha^{-1} de N) indicando que estimando a dose de LE com base no fornecimento de N para uma taxa de mineralização de 28% a incorporação do resíduo no solo 60 dias após sua aplicação não alterou significativamente os teores disponíveis do nutriente.

2.2.3.1.7 Rendimentos da cana-de-açúcar

O efeito dos tratamentos nos teores de N nas folhas (Nfol), no caldo (N-caldo) e sobre a produção de colmos (TCH) podem ser observados no ANEXO F.

Em 2002/03 houve efeitos significativos das doses de N mineral nos teores de N-caldo e das épocas de incorporação na TCH.

Não houve efeitos dos tratamentos nos teores foliares de N nas duas épocas de amostragem (4,5 e 12 meses de idade). Os maiores teores de N-caldo foram observados nas

menores doses (LE+0N e LE+60N) sendo que na maior dose (LE+120N) houve redução de cerca de três vezes na concentração do nutriente que variou de 20 para 6 mg L⁻¹. A concentração de N no caldo foi similar e esteve dentro da faixa de variação encontrada por Beauclair (1994) para diferentes variedades de cana (17 a 99 mg L⁻¹). Deve-se ressaltar que este autor empregou NaOH 45% v/v para alcalinizar o caldo de cana.

Marques (1996) aplicando doses de LE até 160 t ha⁻¹ observou um aumento linear no teor de N no caldo da cana, variando de 50 a 65 mg L⁻¹, este último verificado na maior dose do resíduo.

A incorporação do resíduo 60 dias após a aplicação resultou nas maiores produções de colmos (Figura 11) e, possivelmente, esse efeito se deve à maior pluviosidade nesta época – dezembro em comparação à observada em outubro (Figura 2). A maior disponibilidade de água e a aplicação de N-mineral quando da incorporação do resíduo resultaram em maior produção de fitomassa pela planta.

Marques (1990) e Marques (1996) em dois experimentos à campo, também não verificou efeitos de doses de N na produção de colmos de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto complementado com N mineral.

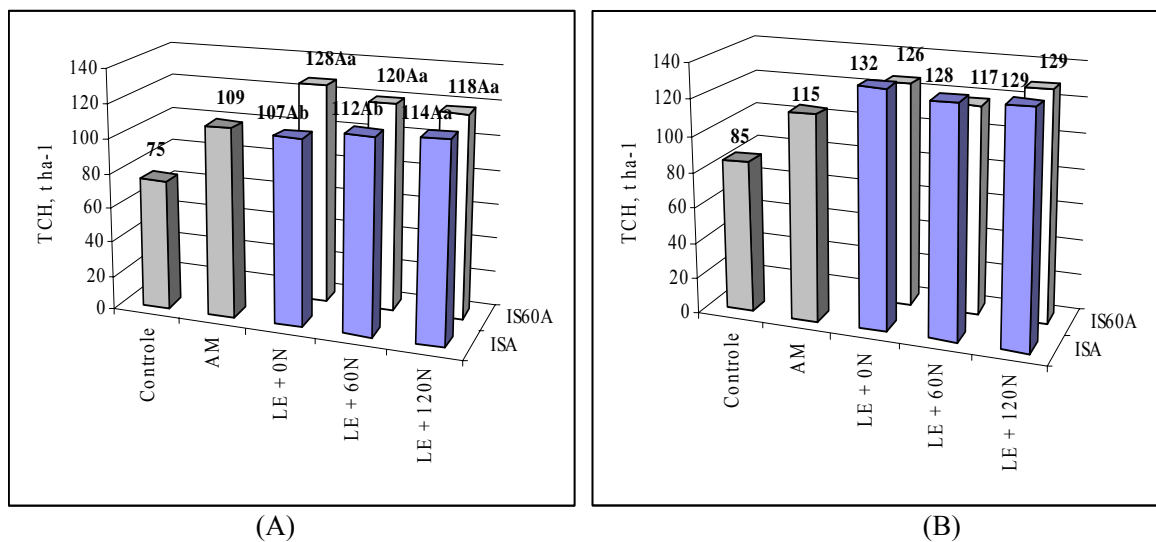


Figura 11 - Produção de colmos (TCH) em função de doses de N e épocas de incorporação do LE, nas safras 2002/03 (A) e 2003/04 (B). Médias seguidas de mesma letra no topo das colunas, maiúsculas para as épocas de incorporação e minúsculas para as doses de N não diferem entre si (Tukey a 5%)

Outros autores também não têm evidenciado resposta positiva da cana-de-açúcar na produção de colmos. Thurler et al. (1984) com doses entre 0 e 180 kg ha⁻¹ de N em diferentes tipos de manejo do solo e Alonso et al (1984) em diferentes solos com doses de 0, 72, 90, 180 kg ha⁻¹ de N aplicado a partir de diferentes fontes minerais do nutriente (uran, uréia, nitrato de amônio e sulfato de amônio) não observaram diferenças na TCH para as doses e fontes de N.

Na safra seguinte (2003/04) houve efeito das doses de N nos teores foliares do nutriente para a amostragem realizada aos 4,5 meses. De modo geral houve aumentos lineares nos teores foliares com a aplicação de N adicional via fertilizante (Figura 12). Isso está de acordo com os resultados relatados por Carbajal apud Malavolta et al. (1989) nos quais o autor verificou incrementos lineares nos teores de N-total; N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ nas folhas de cana-de-açúcar aplicando doses de nitrogênio variando de zero a 120 kg ha⁻¹.

Verifica-se, todavia, que o incremento nos teores foliares de N por unidade de fertilizante adicionado é baixo, muito provavelmente devido ao fato de que na dose zero, ou seja, sem aplicação adicional do fertilizante mineral, os teores foliares estavam em níveis acima da faixa considerada adequada para a cultura que de acordo com critério de Raij et al. (1997) é de 15 a 25 g kg⁻¹. Neste ano (2003/04) não foram observados efeitos das épocas de incorporação provavelmente em função da maior disponibilidade de água, via chuvas, ao longo do ano.

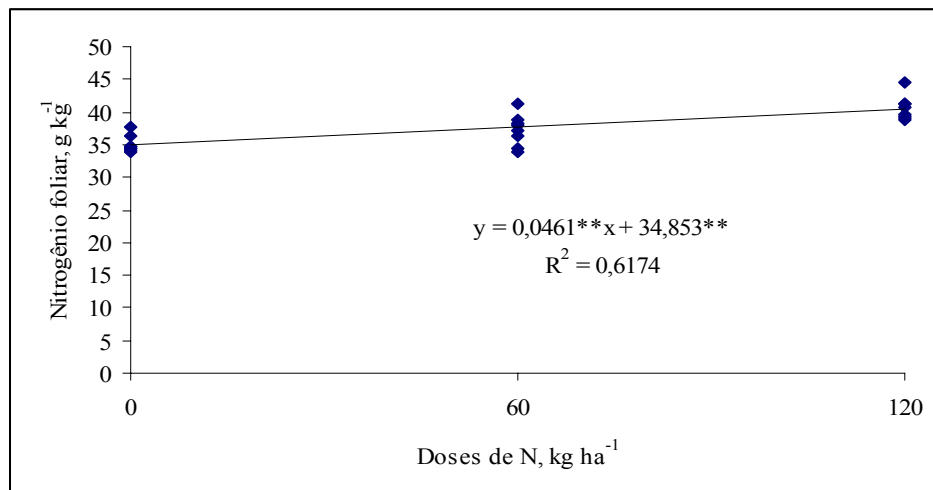


Figura 12 - Teores foliares de N em função da aplicação de LE + N. ** = significativo a 1% pelo teste F

Isso reforça a hipótese levantada para o efeito das épocas na TCH na primeira safra (2002/03), uma vez que a incorporação tardia coincidiu com a época de maior incidência de

chuvas. Com maior disponibilidade de água as plantas produziram mais colmos, porém de modo semelhante ao observado na primeira safra não responderam a aplicação de N adicional via fertilizante mineral.

Uma observação detalhada do ANEXO F evidencia que todos os tratamentos apresentaram teores foliares dentro da faixa de suficiência resultado da disponibilidade natural do nutriente no solo. Verificou-se correlação positiva e significativa da TCH e do nitrogênio foliar nas folhas coletadas com 4,5 meses de idade (Nfol_{4,5 meses}) com o teor de N-orgânico do solo em 2002/03 e entre TCH e o Nfol_{4,5 meses} para os dados de 2003/04 (Tabela 9). O incremento nos teores de N-orgânico verificados no primeiro ano, ao que tudo indica, revelou-se uma reserva importante do nutriente principalmente para uma condição de menor disponibilidade hídrica.

Para o teor de N a amostragem de folhas no final do ciclo não se mostrou importante na previsão da produção de colmos apresentando baixos índices de correlação.

Os demais parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar são apresentados no ANEXO G e Figura 13. Houve efeitos significativos da aplicação de LE + N nos valores de açúcares redutores (AR) em 2002/03. No ano 2003/04 verificou-se efeitos na % de fibras, Pol da cana e AR.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação linear entre produção de colmos (TCH), teor foliar de N, teor de N-inorgânico no caldo, teor de N-inorgânico e orgânico no solo nos dois anos agrícolas (2002/03 e 2003/04)

2002/2003					
	Nfol _{4,5 meses}	Nfol _{12 meses}	N-inorgânico	N-orgânico	N-caldo
TCH	0,230 (0,2043)	0,207 (0,2547)	-0,047 (0,7961)	0,479 (0,0055)	-0,068 (0,7109)
Nfol _{4,5 meses}	...	0,343 (0,0542)	-0,169 (0,3556)	0,483 (0,0051)	-0,189 (0,2991)
Nfol _{12 meses}	-0,285 (0,1140)	0,279 (0,1218)	-0,087 (0,6338)
N-inorg.	0,053 (0,7692)	-0,143 (0,4359)
N-org.	-0,618 (0,0002)
N-caldo
2003/2004					
	Nfol _{4,5 meses}	Nfol _{12 meses}	N-inorgânico	N-orgânico	N-caldo
TCH	0,431 (0,0138)	-0,135 (0,4622)	0,291 (0,1066)	-0,008 0,9624)	-0,326 (0,0686)
Nfol _{4,5 meses}	...	-0,001 0,9998)	0,379 (0,0323)	-0,206 0,2565)	-0,315 (0,0794)
Nfol _{12 meses}	-0,067 0,7146)	-0,091 0,6182)	-0,147 (0,4237)
N-inorg.	-0,136 0,4561)	-0,104 (0,5701)
N-org.	-0,146 (0,4247)
N-caldo

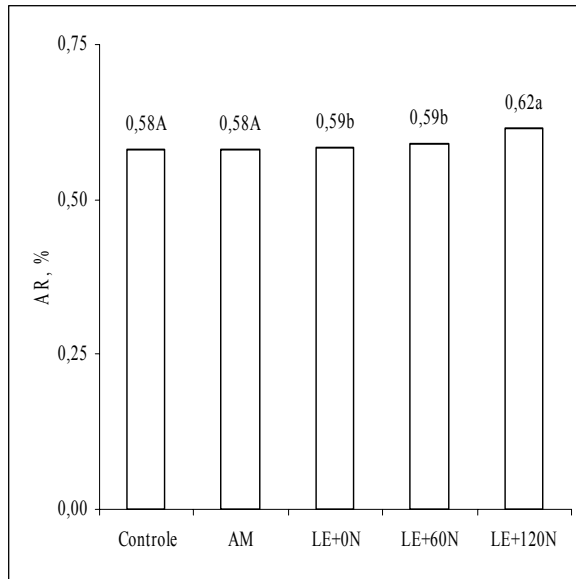
Valores entre parênteses: Prob > |r|

As doses de N adicionais aplicadas ao LE resultaram em aumentos no teor de açúcares redutores % da cana nas duas safras (Figuras 13a e 13b). O tratamento LE + 0N apresentou valores de AR% semelhantes ao do tratamento AM. Nesse aspecto, a aplicação de LE sem aplicação adicional de N mineral, ou até na dose de 60 kg ha⁻¹, não interferiu no valor de AR% da cana.

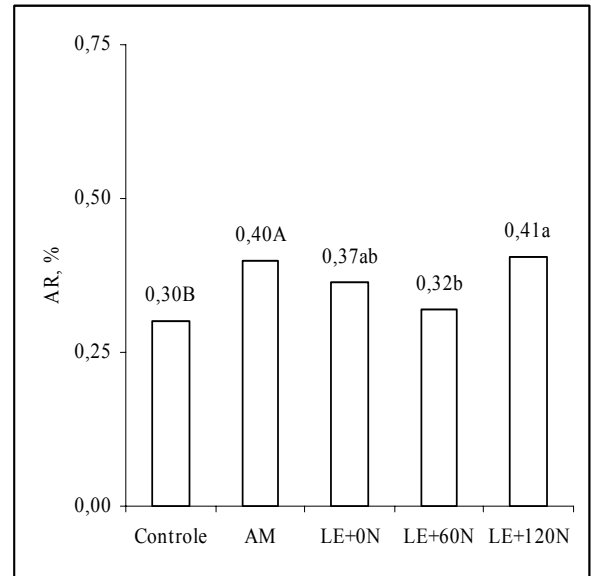
De acordo com Hart (1970) altos níveis de nitrogênio aplicados na cana-de-açúcar contribuem para a redução na concentração de sacarose e aumento do teor de açúcares redutores. Esse efeito depressivo do N no conteúdo de sacarose também foi verificado por outros autores (BURR, LANDRAU JR e SAMUELS, MOLLER, CHWAN-CHAU apud ORLANDO FILHO, 1983) e pode ser atribuído a maior permanência da planta em estagio vegetativo com redução do período de maturação.

Orlando Filho e Souza (1977) estudando a influencia da adubação nitrogenada em soqueiras de segundo corte (CB41-76) cultivadas num Latossolo Vermelho não verificaram efeitos deletérios do N na qualidade tecnológica do caldo relatando, inclusive, aumentos na Pol%. Neste sentido, Silva et al. (2001) também verificaram aumentos lineares na Pol% da variedade RB72-454 cultivada com doses de LE (0, 15 e 30 t ha⁻¹ em base seca). Marques (1990) estudando doses de LE (0, 4, 8, 16 t ha⁻¹) na cana-planta e em reaplicação na soqueira verificou que não houve diferença significativa entre os tratamentos (testemunha, fertilização mineral, adubação organo-mineral, e doses de lodo de esgoto) nos valores de TCH, Brix, Pol%, Fibras%. Essa resposta da cana-de-açúcar foi novamente observada por Marques (1996) trabalhando com doses de LE (0, 40, 80 e 160 t ha⁻¹) associadas à aplicação de 0, 50 e 100% de fertilizantes minerais.

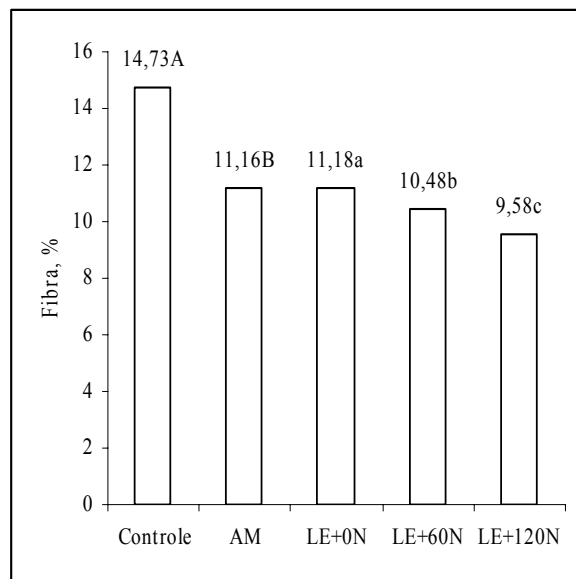
Rodella e Orlando Filho (1984) verificaram que a aplicação de níveis crescentes de nitrogênio mineral, de até 160 kg ha⁻¹, em soqueiras, tendem a reduzir o teor de sacarose de variedades de cana-de-açúcar (NA56-79, CB53-98, IAC52-150) cultivadas em diferentes locais. Os autores verificaram também que houve efeitos significativos da interação entre nutrientes, neste caso em particular do N, P e K, que dificultaram uma avaliação isolada do efeito do N. As interações entre os nutrientes citados e outros adicionados ao solo com a aplicação do LE podem ser responsáveis pela discrepância nos resultados obtidos.



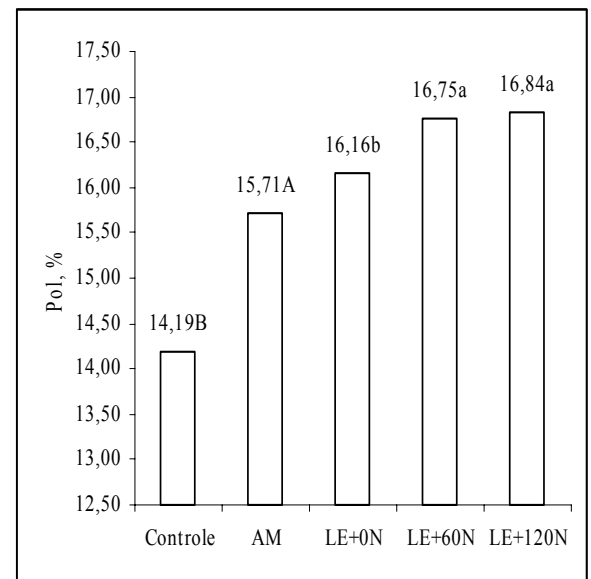
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 13 - Açúcares redutores no caldo de cana-de-açúcar colhida em 2002/03 (A) e em 2003/04 (B). Porcentagem de fibras (C) e Pol% (D) no caldo em 2003/04. Médias seguidas de mesma no topo das colunas, maiúsculas para controle vs AM e minúsculas para as doses de N, não diferem entre si (Tukey a 5%)

No presente estudo, na segunda safra (2003/04), verificou-se aumento da Pol% com as doses de N (Figura 13d). Os tratamentos que receberam 60 e 120 kg ha⁻¹ de N adicional apresentaram as maiores concentrações de sacarose em concordância com as observações de Rodella e Orlando Filho (1984).

A ANOVA para os efeitos das doses de N e das épocas de incorporação sobre os teores de açúcares totais recuperáveis (ATR) foi significativa apenas para a segunda safra (2003/04). O teste de Tukey a 5%, contudo, não mostrou diferença entre as médias (Figura 14).

A quantidade de toneladas de açúcar teoricamente produzida por hectare (TAH), por sua vez, pode ser observada na Figura 15.

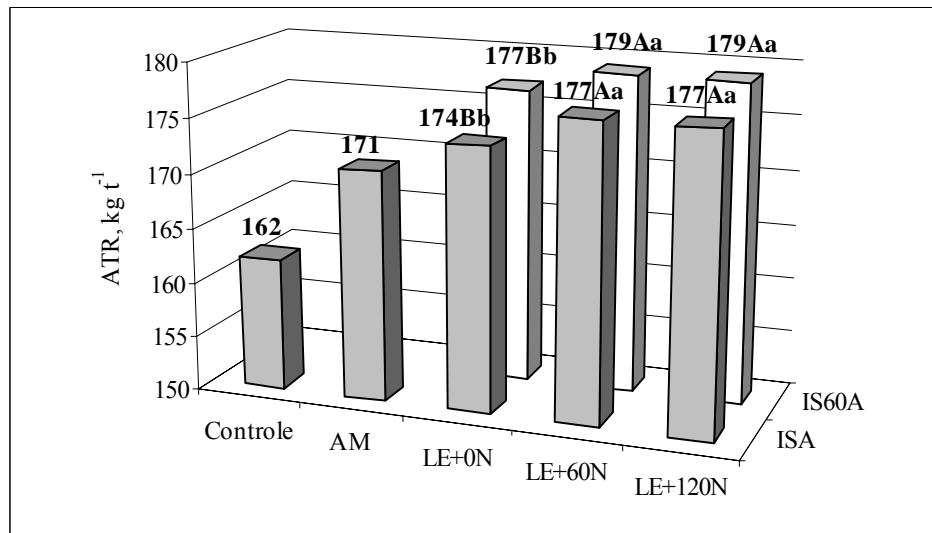


Figura 14 - Açúcar Total Recuperável (ATR) em função de doses de N e épocas de incorporação na segunda safra (2003/04) do experimento com soqueiras. Médias seguidas de mesma letra no topo das colunas, maiúsculas para as épocas de incorporação e minúsculas para as doses de N não diferem entre si (Tukey a 5%)

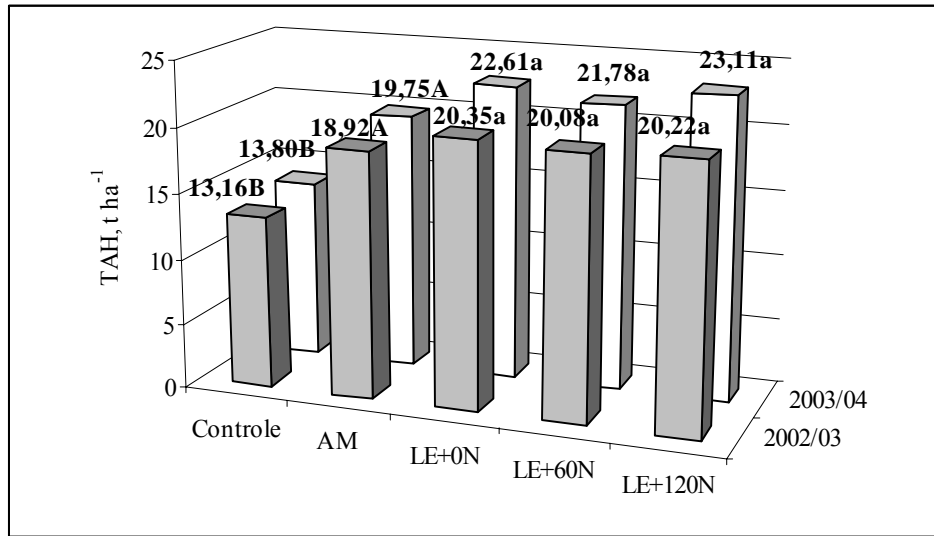


Figura 15 - Toneladas de açúcar por hectare (TAH) em função da adubação mineral (AM) e da aplicação de LE com e sem N. Médias seguidas de mesma letra no topo das colunas, maiúsculas para o contraste entre Controle vs AM e minúsculas para as doses de N dentro de cada ano, não diferem entre si (Tukey a 5%)

Os resultados obtidos indicam que a aplicação de LE foi tão eficiente quanto a adubação mineral (AM) e que considerando as variáveis TCH, ATR e TAH a aplicação adicional de N mineral ao LE não acarretou benefício adicional.

Os resultados obtidos estão de acordo com o verificado por Deschamps e Favaretto (1997) que trabalhando com feijoeiro e girassol relataram que a aplicação de 100% do N, via lodo de esgoto, não provocou diferenças na produção dessas culturas em comparação à adubação mineral. Marques (1996) relatou a possibilidade de se reduzir em 50% a aplicação de N com a utilização do LE na cultura da cana-de-açúcar, em estudo à campo, sem prejuízos na produção de colmos e nos parâmetros tecnológicos do caldo.

2.2.3.1.8 Macronutrientes na cana

Com relação aos demais macronutrientes (P, Ca, K, Mg e S) nas folhas e no caldo os resultados obtidos são apresentados nos ANEXOS H, I e J.

A faixa de teores desses elementos nas folhas, considerada adequada, de acordo com Raij et al. (1997) é igual a: 1,5 - 3,0 g kg⁻¹ de P; 10-16 g kg⁻¹ de K; 2,0-8,0 g kg⁻¹ de Ca; 1,0-3,0 g kg⁻¹ de Mg e 1,5-3,0 g kg⁻¹ de S. Verifica-se que em todos os tratamentos os teores desses macronutrientes estavam dentro da faixa preconizada por Raij et al. (1997). A Figura 16

demonstra que a aplicação de LE foi eficiente no estabelecimento de teores adequados de macronutrientes nas folhas de cana-de-açúcar aos 4,5 meses de idade. Verifica-se também que nas folhas coletadas aos 12 meses, no mesmo dia da colheita do experimento os teores da maioria dos nutrientes reduziram consideravelmente, exceção feita para o potássio que chegou inclusive aumentou com o aumento da idade (Figura 17).

Com relação aos teores de K nas folhas deve-se salientar que foi aplicado uma quantidade de KCl igual em todos os tratamentos mas os tratamentos com LE apresentavam uma quantidade adicional proveniente do resíduo. Esta quantidade de K é insuficiente para suprir as necessidades da maioria das plantas cultivadas mas pode ser o motivo para que os teores foliares desse elemento terem sido maiores apesar de estatisticamente não significativos (Figura 15 e 16).

Oliveira et al. (1995) verificaram aumentos na absorção de P, Ca, Mg, K e S por plantas de sorgo com a aplicação de doses de lodo de esgoto. Efeito similar foi relatado por Simonete et al. (2003) trabalhando com milho cultivado num Argissolo tratado com doses de LE.

Para o caldo de cana-de-açúcar os teores de P, K, Ca, Mg e S no caldo da cana-de-açúcar nas duas safras podem ser observados na Figura 18. Verifica-se que tal como observado para as folhas o enxofre foi o elemento que apresentou as maiores alterações no caldo. Com relação ao fósforo, verifica-se que a aplicação do LE resultou em quantidades adequadas no caldo, nos dois anos avaliados, para uma boa clarificação (131 mg L^{-1} de P), segundo Hugot (1977) e para a fermentação alcoólica (100 mg L^{-1} de P) de acordo com Amorim (1985).

Marques (1996) não verificou efeitos de doses de lodo de esgoto na concentração de P no caldo de cana. As respostas da planta quanto ao P foliar não seguiram uma tendência lógica.

Os teores de K, Ca, Mg no caldo estão em conformidade com os valores encontrados por Marques (1996) e Silva (1995).

2.2.3.1.9 Metais pesados na cana

Os metais pesados nutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) nas folhas e no caldo são apresentados respectivamente nos ANEXOS K e L. De acordo com Raij et al. (1997) a faixa de teores foliares adequados para os micronutrientes é igual a $6-15 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu, $40-250 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe, $25-250 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn e $10-50 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn. Pelos dados do ANEXO K, verifica-se que os teores de todos esses elementos estavam dentro da faixa de teores acima citada.

Os metais Cd, Cr, Ni e Pb não foram detectados nas amostras de folhas colhidas nas duas épocas de amostragem. As medidas dos teores foliares desses elementos foram muito baixas e próximas do limite de determinação da técnica analítica ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$).

No caldo (ANEXO L) verificou-se efeito dos tratamentos apenas para os teores de Mn e Zn. A Figura 19 mostra a diferença para as médias desses elementos. De acordo com Amorim (1985) os teores de Mn e Zn ideais para a fermentação alcoólica, considerando uma diluição de 30% referente a água de embebição que a cana recebe no processo de moagem, são iguais a $2,5 \text{ mg L}^{-1}$ para os dois elementos. Desse modo verifica-se que o teor de zinco nos tratamentos com aplicação adicional de N esteve abaixo do teor preconizado por Amorim (1985) o que é indicativo de que as quantidades adicionadas apresentavam uma fitodisponibilidade baixa.

De modo análogo ao que ocorreu com as folhas, no caldo também não foram detectados os metais Cd, Cr, Ni e Pb. Segundo White (1954) os teores de Cr e Ni no caldo que reduziram em 50% o crescimento de leveduras, afetando negativamente a fermentação alcoólica, seriam iguais a 168 e 105 mg L^{-1} .

No presente estudo esses metais não foram detectados sendo verificado que a adição do LE na dose utilizada não traz qualquer efeito depreciativo na qualidade da matéria prima, com relação à contaminação com metais pesados.

Isso vai contra os resultados relatados por Silva (1995) que verificou que a aplicação de 30 t ha^{-1} de LE, 65% de umidade, aumentou os teores de Cr e Ni no caldo da cana-de-açúcar, em comparação ao tratamento testemunha, de $0,18$ para $0,38 \text{ mg L}^{-1}$ de Cr e de $0,24$ para $0,54 \text{ mg L}^{-1}$ de Ni.

Entretanto, outros autores também não verificaram a presença desses metais em cana-de-açúcar. Marques (1996) não detectou a presença de Cd, Cr e Pb em amostras de folhas, colmo e caldo de cana cultivada com a utilização de doses de LE variando de 0 a 160 t ha^{-1} (74% de umidade). De modo semelhante, Oliveira (2000) não encontrou teores mensuráveis de Cd, Cr, Ni e Pb nas folhas e no caldo de cana cultivada com doses de LE de até 210 t ha^{-1} , base seca.

Na literatura existem informações que dão conta de que as plantas, de uma maneira geral, absorvem menos de 1% do teor de metais acumulados no solo e esta absorção não é proporcional aos teores dos mesmos no solo (CHANG et al., 1997).

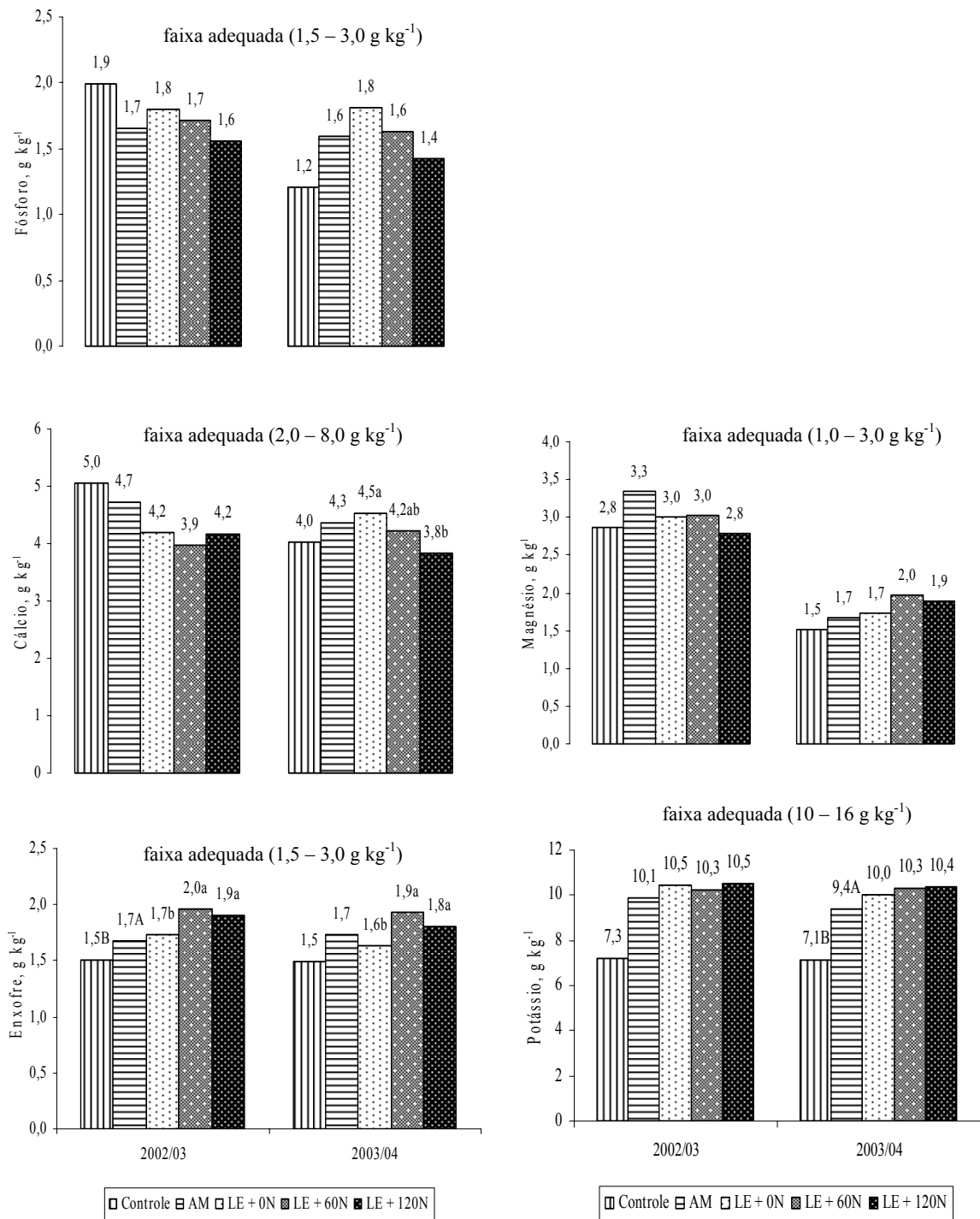


Figura 16 -Concentração de macronutrientes na folha de cana-de-açúcar em função da adubação mineral (AM) e da aplicação de lodo de esgoto e nitrogênio mineral. Amostragem realizada no período de máximo desenvolvimento vegetativo (\pm 4,5 meses). Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para o contraste Controle vs AM e minúsculas para as doses de N não diferem entre si (Tukey a 5%)

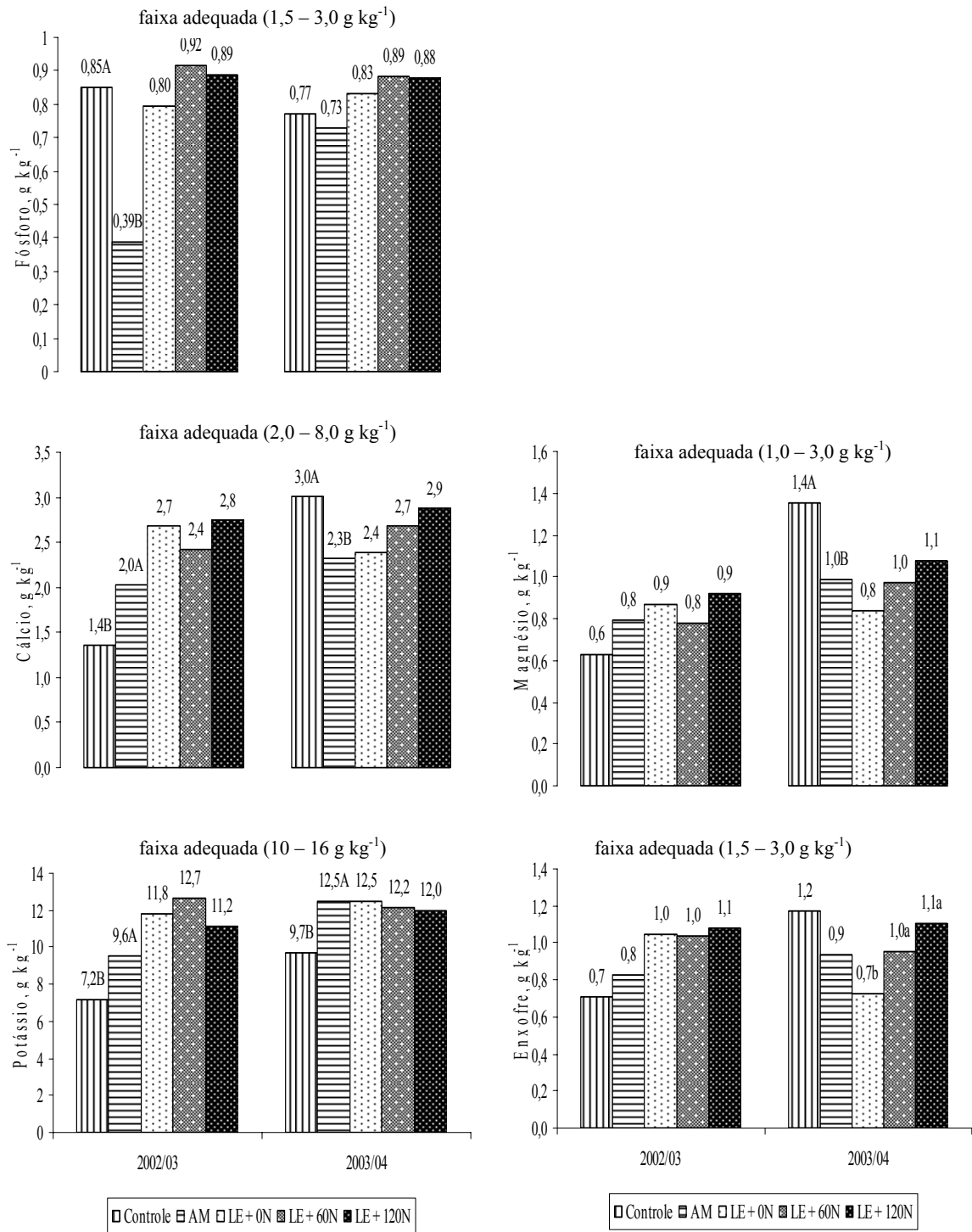
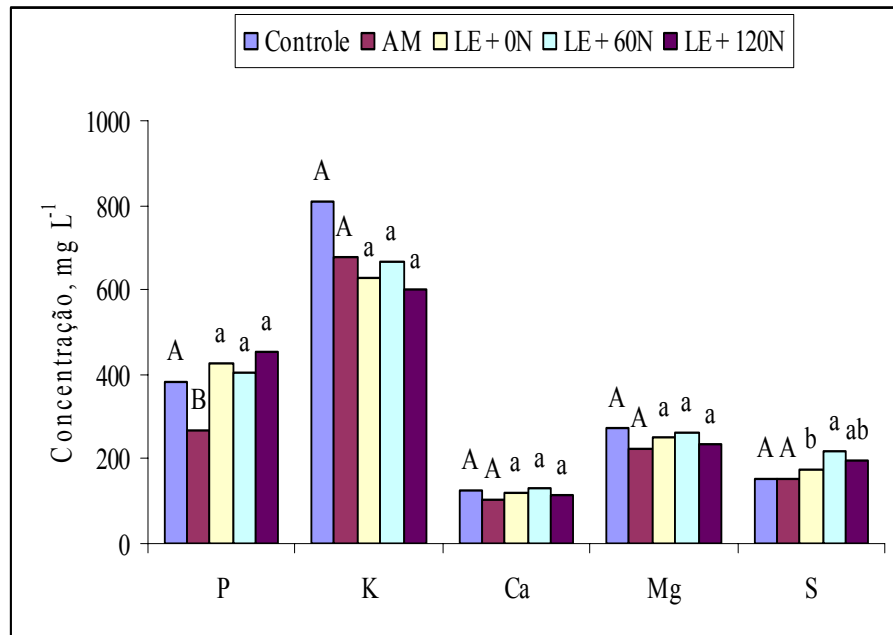
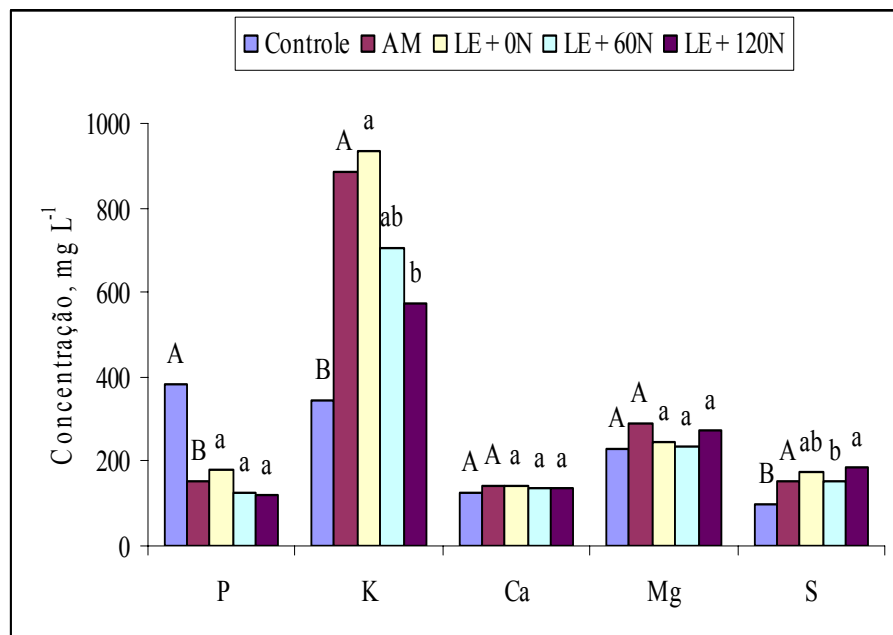


Figura 17 - Concentração de macronutrientes na folha de cana-de-açúcar em função da adubação mineral (AM) e da aplicação de lodo de esgoto e nitrogênio mineral. Amostragem realizada na colheita dos colmos (\pm 12 meses). Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas para o contraste Controle vs AM e minúsculas para as doses de N não diferem entre si (Tukey a 5%)



(A)



(B)

Figura 18 - Concentração de alguns macronutrientes no caldo da cana no anos de 2002/03 (A) e 2003/04 (B). Médias seguidas de mesma letra para cada elemento, maiúsculas para o contraste entre controle e adubação mineral e minúsculas para as doses de N, não diferem entre si (Tukey a 5%)

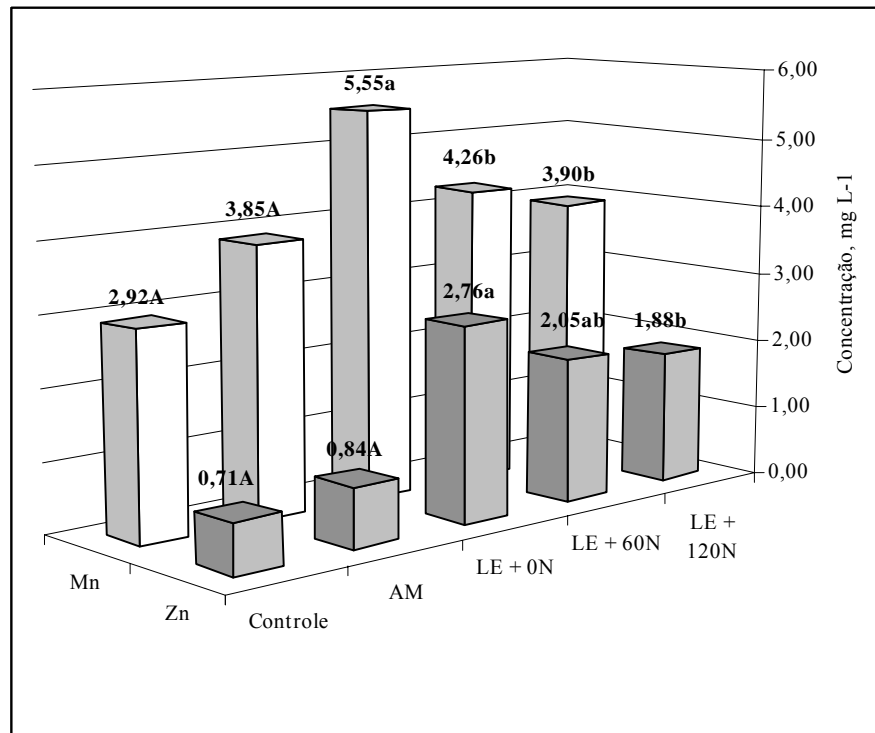


Figura 19 - Manganês e zinco no caldo de cana-de-açúcar. Médias seguidas de mesma letra para cada elemento, maiúsculas para o contraste entre controle e adubação mineral e minúsculas para as doses de N, não diferem entre si (Tukey a 5%)

Vários fatores podem explicar a não transferência de metais do solo para as plantas entre os quais podem-se citar: complexação pela matéria orgânica; adsorção aos óxidos de Fe e Al, tanto do solo como do próprio lodo; mecanismos de retenção desses elementos nas raízes das plantas e mesmo interações antagônicas com Ca^{2+} , Mn^{2+} e Zn^{2+} .

2.2.3.1.10 Metais pesados no solo

Os teores totais de metais pesados, não nutrientes de plantas (Cd, Cr, Ni e Pb), no solo são apresentados no ANEXO M. Não houve efeitos significativos dos tratamentos nos teores desses metais.

Verifica-se que as alterações nos teores totais desses metais no solo tratado com LE não são decorrentes da adição do resíduo tendo em vista as quantidades aplicadas ao solo via lodo (Tabela 8).

Considerando os dados da Tabela 8 e a densidade do solo igual a 1 g cm^{-3} verifica-se que a adição de 30 t ha^{-1} de LE em dois anos consecutivos adicionou ao solo, na camada de 0-0,2 m, cerca de $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd, 3 mg kg^{-1} de Cr, $0,65 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni e $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb.

Tanto o conteúdo natural do solo como a ação antrópica podem explicar, em parte, os teores de Pb encontrados no solo.

Conforme verificado por Guerra et al., (1999) os teores de metais pesados no solo podem variar em função da rocha a partir da qual o mesmo se originou e neste contexto os teores de Cd, Cr, Ni e Pb observados neste estudo estão da faixa de teores relatada pelos autores e apresentada da Tabela 3.

A ação antrópica pode ser resultado da deposição atmosférica de Pb dado que a área experimental situa-se às margens de uma rodovia de grande circulação de veículos e cultivada com cana-de-açúcar a mais de 35 anos.

O tráfego de veículos ao longo das décadas de 60 e 70 - épocas nas quais era permitido adicionar um aditivo à base de chumbo na gasolina - pode ter contribuído para a deposição de Pb proveniente da queima de combustíveis (BAIRD, 2002).

Os teores observados, contudo, estão dentro da faixa considerada normal para solos que é de 1 a 200 mg kg^{-1} (WALLACE; WALLACE, 1994).

A adição de lodo de esgoto aos solos agrícolas também deve ser considerada uma intervenção antrópica e o monitoramento da qualidade do solo no que se refere aos teores de metais não deve ser negligenciada mesmo porque os maiores efeitos deletérios destes elementos são evidenciados em função de efeitos cumulativos em longo prazo.

2.2.4 Conclusões

A aplicação de 30 t ha^{-1} de lodo de esgoto, em dois anos sucessivos, causou acúmulo de N-orgânico no solo. O efeito das épocas de incorporação do resíduo ficou restrito ao N-orgânico do solo e apenas no segundo ano de aplicação não havendo diferenças para os teores de N-inorgânico ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$).

A aplicação de lodo de esgoto causou aumento na condutividade elétrica do solo, mas não a níveis deletérios para os vegetais; não afetou o pH e a disponibilidade de P, Ca e Mg para a cana-de-açúcar. Não houve alterações na disponibilidade de Cu, Fe, Mn e Zn no solo com a aplicação de lodo de esgoto nem diferenças nos teores foliares dos mesmos.

A aplicação de doses de LE iguais a aproximadamente 15 t ha⁻¹ em dois anos consecutivos não causou aumento nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb nas folhas e no caldo o que indica que sua utilização como condicionador de solos canavieiros é viável.

Em termos de produção de colmos, a aplicação adicional de N mineral quando da aplicação de lodo de esgoto como fonte do nutriente não se mostra necessária e a época de incorporação afetou a TCH.

Referências

- ABREU, C.A.; ANDRADE, J.C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.240-250.
- ABREU, M.F. **Extração e determinação de simultânea por emissão em plasma de nutrientes e elementos tóxicos em amostras de interesse agrônomo**. 1997. 135p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de Campinas, Campinas. 1997.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology: a comprehensive study of Saccharum source-to-sink system**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752p.
- ALONSO, O.; FONTANARI, N.; GERALDI, L.; NAGUMO, M.; CORRÊA, W.J.; SERRA, G.E. Efeitos de fontes de nitrogênio aplicadas em superfície e profundidade, em cana-soca cultivada em diferentes solos. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Bandeirante, 1984. p.143-148.
- AMORIM, H.V. Nutrição mineral de leveduras: aspectos teóricos e práticos. In: SEMANA DE FERMENTAÇÃO “JAIME ROCHA DE ALMEIDA”, 4. 1985, Piracicaba. **Anais**, Piracicaba: STAB, 1985. 149p.
- ANDRADE, C.A. **Fração orgânica de biossólidos e efeitos no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um Latossolo cultivado com Eucalipto**. 2004. 121p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.927-938, 2000.
- AQUINO NETO, V.D. **Avaliação do aproveitamento agrícola de lodos de curtume**. 1998. 110p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBWE, H.; VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta: doses e fracionamento. **STAB**, Piracicaba, v.4, p.26-33, 1986.

BAIRD, C. **Química ambiental**. Porto Alegre: Bookman. 2002. 622p.

BANARJEE, M.R.; BURTON, D.L.; DEPOE, S. Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Oxford, v.66, n.3, p.575-579, 1977.

BARBARICK, K.A.; IPPOLITO, J.A. Nitrogen fertilizer equivalency of sewage biosolids applied to dryland winter wheat. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, p.1345-1351, 2000.

BARNES, A.C. **The sugarcane**. New York: Interscience. 1964, 312p.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).

BEAUCLAIR, E.G.F. **Produtividade da cana-de-açúcar em função de alguns macronutrientes presentes no caldo e no solo**. 1994. 97p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.187-192, 1989.

BERTONCINI E.I.; MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.737-744, 1999.

BERTONCINI, E.I. **Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido: Extração seqüencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas**. 2002. 195p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T. Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizante organo-mineral IPT na cultura de milho. **Fertilizantes**, São Paulo, v.4, n.1, p.14-15, 1982.

BITTENCOURT, V.C.; FAGANELLO, B.F.; SALATA, J.C. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.5, n.1, p.25-29, 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 lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.11, p.1639-1647, 2002.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).
- CARNAÚBA, A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.8, n.3/4, p.24-41, 1990.
- CARNEIRO, A.V.; TRIVELIN, P.C.O. ; VITÓRIA, R.L. Utilização da reserva orgânica de nitrogênio do tolete de plantio no desenvolvimento da cana. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.52, n.2, p.199-209, 1995.
- CASARINI, D.C.P.; DIAS, L.C.; LEMOS, M.M.G. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo:CETESB, 2001. 73p. (Série Relatórios Ambientais).
- CESAR, M.A.A.; SILVA, F.C. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira**. Piracicaba: ESALQ, 1993. 108p.
- CHANG, A.C.; HYUN, H.; PAGE, A.L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sludge treated field plots: Plateau o time bomb? **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, p.11-19, 1997.
- CIIAGRO. Disponível em: www.iac.sp.gov.br/Ciiagro. Acessado em: 01 dez. 2004.
- CLEMENTS, H.F. **Sugarcane crop logging and crop control: principle and practice**. Hawaii: The University of Hawaii Press. 1980, 520p.
- CLEMENTS, H.F.; MARTIN, S.P.; MORIGUCHI, S. Compostion of sugarcane plants grown in deficiency nutrient solution. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, n.45, p.227-239, 1941.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de bio sólido em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação (Manual Técnico)**. São Paulo, 1999. 35p.
- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – **Manual de instruções**. Piracicaba: Consecana, 1999. 92p.
- CORRÊA, R.S. Efficiency of five biosolids to suply nitrogen and phosphorus to ryegrass. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1133-1139, 2004.
- CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, A.J. Biosolids effectiveness to yield ryegrass base don their nitrogen content. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.274-280, 2005.

COX, D.A. Pelletized sewage sludge as fertilizer for containered plants: plant growth and nitrogen leaching losses. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.18, n.12, p-2783-2795, 1995.

CUNNINGHAM, I.D.; KEENEY, D.R.; RYAN, J.A. Yield and metal composition of crop and rye grown on sewage sludge amended soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.4, p.448-454, 1975.

DA ROS, C.O.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. 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, 1993.

DEMATTE, J.L.I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Visão Agrícola**, Piracicaba; USP: ESALQ, 2004, p.48-67.

DESCHAMPS, C.; FAVARETTO, N. Efeito do lodo complementado com fertilizante mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura do feijoeiro e do girassol. **Sanare**, Curitiba, v.8, p.33-38, 1997.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botânica, 1952. 371p. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999, 412p.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Test methods for evaluating solid waste**. Physical/Chemical methods. 3. ed. Washington, D.C. Environmental Protection Agency, Office of solid waste and Emergency response, U.S. Government Printing Office. snp. SW-846. 1986.

EPSTEIN, E. **Land application of sewage sludge and biosolids**. Boca Raton: CRC Press LLC. 2003, 201p.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: principios e perspectivas**. São Paulo: EDUSP; Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. 341p.

EPSTEIN, E. TAYLOR, J.M.; CHANEY, R.L. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.5, p.422-426, 1976.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Title 40 CRF – Part 503. Final rules: standards for the use or disposal of sewage sludge. **Federal Register**, Washington, v.58, n.32, p.9387-9415, 1993.

FOULER, G. **Principles and applications of geochemistry**. New Jersey:Prentice Hall, 1998. 600p.

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, n. 3, p.569-577, 2004.

GARRET, R.G. Natural sources of metals to the environment. **Human and ecological risk assessment**, Philadelphia, v.6, n.6, p.945-963, 2000.

GILLMAN, G.P.; SUMPTER, E.A. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.24, p.61-66, 1986.

GILMOUR, J.T.; SKINNER, V. Predicting plant available nitrogen in land-applied biosolids. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.28, n.6, p.1122-1126, 1999.

GLÓRIA, N.A.; CATANI, R.A.; MATUO, T. A determinação da capacidade de troca de cátions do solo pelo método do EDTA. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v.40, p.195-198, 1965.

GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M.B. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340p.

HART, C.E. Effect of nitrogen deficiency upon translocation of ^{14}C in sugarcane. **Plant Physiology**, Lancaster, v.46, p.419-422, 1970.

HUE, N.V. Sewage sludge. In: RECHCIGL, J.E.(Ed.) **Soil Amendments and environmental quality**. Boca Raton: CRC Press, 1995, p.199-247.

HUGOT, E. **Manual de Engenharia Açucareira**. São Paulo: Mestre Jou. v.1, 1977. 544p.

HUMBERT, R.P. **The growing of sugarcane**. Amsterdam; New York; Essex: Elsevier. 1968, 770p.

INMAN, J.C.; McINTOSH, M.S. FOSS, J.E.; WOLF, D.C. Nitrogen and phosphorus movement in compost amended soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.11, p.529-532, 1992.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acessado em: 21 nov. 2004.

KELLING, K.A.; PETERSON, A.E.; WALSH, L.M.; RYAN, J.A.; KEENEY, D.R. A field study of the agriculture use of sewage sludge. I. Effect on crop yield and uptake of N and P. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, p.339-345, 1977a.

KELLING, K.A.; WALSH, L.M.; KEENEY, D.R.; RYAN, J.A.; PETERSON, A.E. A field study of the agriculture use of sewage sludge. II. Effect on soil N and P. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, p.345-352, 1977b.

- KIEHL, J.C. Nitrogênio: dinâmica e disponibilidade no solo. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM FERTILIDADE DO SOLO, 1., 1987, Ilha Solteira. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.139-157.
- KONDORFER, G., MARTINS, M. Importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.10, n.3, p.26-31, 1992.
- KORBOULEWSKY, N.; DUPOUYET, S.; BONIN, G. Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals and phosphorus accumulation, **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.31, p.1522-1527, 2002.
- LERCH, R.N.; AZARI, P.; BARBARICK, K.A.; SOMMERS, L.E.; WESTFALL, D.G. Sewage sludge proteins. II: Extract characterization. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.22, n.3, p.625-629, 1993.
- LINDEMANN, W.C.; CARDENAS, M. Nitrogen mineralization potential and nitrogen transformations of sludge-amended soil. **Soil Science American Journal**, Madison, v.48, p.1072-1077, 1984.
- MAGUIRE, R.O.; SIMS, J.T.; COALE, F.J. Phosphorus solubility in biosolids amended soils in the Mid-Atlantic region of the USA. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, p.1225-1233, 2000.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1989, 201p.
- MARQUES, M.O. **Efeitos da aplicação de lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. 1990. 168p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1990.
- MARQUES, M.O. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar**. 1996. 111p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Jaboticabal, 1996.
- MATTIAZZO, M.E. **Amostragem de solo para fins de avaliação da fertilidade na área de reforma de canaviais**. 1982. 114p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.
- MELGAR, R, CAMOZZI, M.E.; FIGUEROA, M.M. **Guia de fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária. 1999, p-13-25.
- MELO, W.J. **Matéria orgânica, nitrogênio e enxofre: curso de atualização em fertilidade do solo**. Jaboticabal: ANDA, 1978, 66p.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R.A.; LEITE, S.A.S. 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.449-456, 1994.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA. 2002. 626p.

MULVANEY, R.L. Methods for determination of inorganic nitrogen in soil. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis: chemical methods**. Madison: SSSA; ASA, 1996.p1125-1139.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A Modified single method for the determination of phosphate in natural waters. **Analitica Chimica Acta**. Amsterdam, v.27, p.31-36, 1962.

NASCIMENTO, C.W.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. Alterações química em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.2, p.385-392, 2004.

O'CONNOR, G.A.; SARKAR, D.; BRINTON, S.R.; ELLIOTT, H.A.; MARTIN, F.G. Phytoavailability of biosolids phosphorus. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.33, p.703-712, 2004.

OLIVEIRA, F.C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2000.

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

OLIVEIRA, F.C.; MARQUES, M.O.; BELLINGIERI, P.A.; PERECIN, D. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, 360-367, 1995.

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

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

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana de açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 368p. (Coleção Planalsucar, 2).

PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. **Edafologia para la agricultura y el medio ambiente**. Madrid: Mundi-Prensa. 2003, 960p.

ProCana.Disponível em: <[http:// www.procana.com.br](http://www.procana.com.br)>. Acessado em: 01 dez. 2004.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, Piracicaba: Ceres, Potafos. 1991, 343p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed). Cana-de-açúcar. In: **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico – Fundação IAC, 1997. p.237-239. (Boletim Técnico, 100).

REIS, T.C. **Variação da acidez do solo em resposta à adição de materiais orgânicos**. 1998. 65p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

RODELLA, A.A.; ORLANDO FILHO, J. Influencia da aplicação de nitrogênio, fósforo e potássio sobre o teor de sacarose da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Bandeirante, 1984. p.163-168.

ROWEL, D.M.; PRESCOTT, C.E.; PRESTON, C.M. Decomposition and nitrogen mineralization from biosolids and other organic materials: relationship with initial chemistry. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.30, n.4, p.1401-1410, 2001.

RUSCHEL, A.P.; VOSE, P.B. Nitrogen cycling in sugarcane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.67, p.139-146, 1982.

SASTRE, J.; SAHUQUILLO, A.; VIDAL, M.; RAURET, G. Determination of Cd, Cu, Pb e Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, n.462, p.59-62, 1999.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.

SILVA, F.C. **Uso agrônomo de lodo de esgoto: Efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar**. 1995. 170p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.13, n.1, p.1-8, 1998.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; BERNARDES, E.M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.5, p.831-840, 2001.

SILVA, G.M. Influencia da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. (coord.) **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. IAA: PLANALSUCAR, 1983. p.317-332.

SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A.; TEIXEIRA, C.F.A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.10, p.1187-1195, 2003.

SOMMERS, L.E. Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, n.2, p.225-232, 1977.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients**. New York: Wiley. 1986. 380p.

STURION, A.C.; FERNANDES, A.C. Análise direta de cana-de-açúcar pelo método para prensa hidráulica. **BOLETIM TÉCNICO COPERSUCAR**. Piracicaba, v. 8, p.12-15, 1979.

TAN, K.H. **Principles of soil chemistry**. New York: Marcel Dekker. 1992, p.129-206.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

THURLER, A.M.; BERTO, P.N.A.; PEIXOTO, A.A.; ROSA, J.F.C.; LAVORENTI, N.A. Cultivo mínimo e adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Bandeirante, 1984. p.140-143.

TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUES, J.C.S.; VITÓRIA, R.L. Utilização por soqueira de cana de açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia 15N e uréia 15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.2, p.89-99, 1996.

TRIVELIN, P.C.O.; VITÓRIA, R.L.; RODRIGUES, J.C.S. Aproveitamento por soqueira de cana de açúcar de final de ciclo do nitrogênio da aquamônia 15N e uréia 15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.12, p.1375-1385, 1995.

VIEIRA, R.F.; CARDOSO, A.A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.867-874, 2003.

VITTI, G.C. MALAVOLTA, E.; COUTINHO, E.L.M. Uso de fertilizantes nitrogenados e portadores de enxofre. In: SIMPOSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília. **Anais...** Brasília, EMBRAPA, 1984, p.215.

WALLACE, G.A.; WALLACE, A. Lead and other potentially toxic heavy metals in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, p.137-141, 1994.

WHITE, J. **Toxic action of common elements towards yeast growth.** Yeast Technology. London: Chapman and Hall, 1954. 286p.

WISEMAN, J.T.; ZIBILSKE, L.M. Effects of sludge application sequence on carbon and nitrogen mineralization in soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.17, p.334-339, 1988.

WONG, J.W.C.; LAI, M.; FANG, M.; MA, K.K. Effect of sewage sludge amendment on soil microbial activity and nutrient mineralization. **Environment International**, Oxford, v.24, n.8, p.935-943, 1998.

3 USO DE LODO DE ESGOTO NA CANA-PLANTA COMO FONTE DE FÓSFORO: FERTILIDADE DO SOLO, NUTRIÇÃO DA PLANTA E RENDIMENTOS DA CULTURA

Resumo

A utilização agrícola de resíduos orgânicos como fonte de carbono e nutrientes pode incrementar a fertilidade dos solos e trazer, ao mesmo tempo, benefícios sociais e ambientais considerando as possíveis vias de disposição do mesmo. Apesar do lodo de esgoto apresentar em sua constituição consideráveis quantidades de fósforo ainda não há estudos conclusivos sobre a capacidade deste resíduo em fornecer P em quantidades adequadas para as plantas e em especial para a cana planta. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo quantificar a resposta da cana planta (SP83-2847) cultivada sobre um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico por 16,5 meses entre 2002 e 2004, com a substituição da adubação fosfatada pela aplicação de lodo de esgoto (LE). Foram avaliadas a produtividade das plantas, a qualidade do caldo produzido e também atributos químicos do solo tratado com LE. Os tratamentos testados eram em número de sete, a saber: T1 = Controle; T2 = AM (adubação mineral conforme recomendada para o Estado de São Paulo); T3 = LE; T4 = LE + 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅; T5 = LE + 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅; T6 = LE + 135 kg ha⁻¹ de P₂O₅; T7 = LE + 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. A dose de LE utilizada nos tratamentos foi de 8,2 Mg ha⁻¹. O delineamento estatístico adotado foi de blocos casualizados. Os resultados obtidos permitiram concluir que a aplicação do LE ao solo não provocou alterações no pH, fósforo disponível, carbono orgânico e condutividade elétrica do solo nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m. A maior produção de colmos foi obtida no tratamento com a adubação mineral convencional. O conteúdo de fósforo no LE foi suficiente apenas para suprir 25% da necessidade das plantas. Não foram verificados deletérios da aplicação do LE na qualidade do solo, nas plantas, na produtividade da cana planta e no caldo produzido.

Palavras-chave: Biossólido, Resíduo; Fósforo, Fertilidade do Solo, Produção de colmos; Metais pesados

Abstract

Sewage sludge use in sugarcane plants as phosphorus source: soil fertility; plant nutrition and crop yield

The use of sewage sludge on land, as a source of organic carbon and plant nutrients, can improve soil fertility and also to provide environmental and social benefits considering the others possible ways of the waste disposal. Although the phosphorus content in this residue, there are no studies evaluating the need of additional P fertilizer, to improve plant nutrition and yield, in areas treated with sewage sludge (SS). In order to evaluate the effectiveness of SS (in an level of 8,2 Mg ha⁻¹) in supply phosphorus to cane plant (SP83-2847) an experiment was placed in an Ultisol (Argissolo Amarelo eutrófico) testing seven treatments: T1= Control; T2 = Mineral Fertilization (MF); T3 = SS + 0 kg ha⁻¹ P₂O₅; T4 = SS + 45 kg ha⁻¹ P₂O₅; T5 = SS + 90 kg ha⁻¹ P₂O₅; T6 = SS + 135 kg ha⁻¹ P₂O₅; T7 = SS+ 180 kg ha⁻¹ P₂O₅. The statistical design adopted was a randomized block. The results showed that there were no changes on soil CEC, pH, soil organic carbon, soil available P and electrical conductivity that can be due to SS application. The sewage sludge P content was effective to supply only 25% of plant nutrient

requirement. Harmful effects on soil and sugarcane juice quality were not observed with SS application.

Key-words: Biosolid, Residue; Phosphorus, Soil Fertility, Stalk production; Heavy Metals

3.1 Introdução

A preocupação com a degradação dos recursos naturais, em especial do solo e da água é um tema atual e decorre da produção, acúmulo e descarte inadequado de resíduos oriundos da atividade humana e industrial. Um desses resíduos é o lodo gerado no final do tratamento dos esgotos sanitários. De todas as possíveis vias de disposição a aplicação desse resíduo em áreas agrícolas visando utilizar o solo como meio depurador da carga orgânica potencialmente poluidora e reciclar os nutrientes presentes é uma das mais interessantes pois agrega os benefícios ecológicos – devolução ao solo de parte da energia e matéria prima exportada para os centros urbanos via colheitas; agronômicos – incrementando os teores de matéria orgânica e a fertilidade do solo e sociais – melhorando a qualidade de vida pela redução da poluição ambiental e incrementando a produção das culturas.

Dos macronutrientes contidos no lodo de esgoto, depois do nitrogênio, o fósforo (P) é o elemento que merece maior destaque, nem tanto pela quantidade requerida pelas plantas, mas principalmente pela pobreza generalizada dos solos tropicais nesse elemento. Além de estar presente em baixas concentrações no solo, o fósforo sofre reações de fixação nos componentes inorgânicos reduzindo sua disponibilidade para as plantas. Tendo em vista a estreita relação N:P nos lodos de esgoto, com a aplicação desse resíduo aos solos baseado no fornecimento de N para as plantas, muitas vezes a quantidade de P supera as necessidades das culturas de modo geral.

A aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas tem sido estudada para algumas culturas, entretanto, o enfoque principal tem sido com relação aos metais pesados e nitrogênio em detrimento de outros elementos como o fósforo.

A cultura da cana-de-açúcar contribui significativamente com o produto interno bruto do Brasil, sendo responsável por pela maior safra agrícola do país (IBGE, 2004; ProCana, 2004). A manutenção da produtividade requer constantes investimentos no incremento da fertilidade dos solos e no âmbito do manejo de resíduos orgânicos a indústria canavieira é uma das pioneiras com a reciclagem da vinhaça e da torta de filtro nas áreas de produção agrícola. O lodo de esgoto também poderia se tornar um material capaz de incrementar a fertilidade do solo como fonte de carbono e nutrientes.

Neste sentido, diante dos escassos estudos visando especificamente o aproveitamento do fósforo contido no lodo de esgoto para a produção vegetal, este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito da aplicação deste resíduo, com e sem a aplicação adicional de uma fonte mineral de P, na fertilidade do solo e nos rendimentos da cana-de-açúcar.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Revisão de Literatura

3.2.1.1 Importância do fósforo na agricultura

O fósforo, juntamente com o N e o K, é classificado como um macronutriente primário, entretanto, os seus teores nas plantas são baixos, muitas vezes aproximando-se dos macronutrientes secundários Ca, Mg e S (RAIJ, 1991).

Nas plantas o fósforo participa de um grande número de compostos essenciais em diversos processos metabólicos com destaque especial para os relacionados à transferência de energia (MENGEL; KIRKBY, 1987). O seu fornecimento em quantidades adequadas desde o início do desenvolvimento vegetativo é essencial para o crescimento radicular, formação dos primórdios das partes reprodutivas, de frutos e sementes.

Nos tecidos vegetais o fósforo apresenta alta mobilidade quanto à redistribuição, transferindo-se dos tecidos mais velhos para as regiões meristemáticas ativas e sua deficiência causa efeitos drásticos de retardamento do crescimento com sintomas foliares apresentando-se, nas folhas mais velhas, na forma de coloração verde escura ou mesmo avermelhada em consequência do aumento de produção de antocianina (MENGEL; KIRKBY, 1987).

As plantas absorvem P da solução do solo, ou seja, formas solúveis do nutriente. Estas por sua vez, derivam do ácido ortofosfórico (H_3PO_4), que é um ácido poliprótico, que apresenta três etapas de dissociação em função do pH conforme as equações 1, 2 e 3.



Verifica-se, portanto, que nos solos ácidos com pH ao redor de 5,0-6,5, típicos das condições edáficas brasileiras, a forma de P que predomina é H_2PO_4^- (RAIJ, 1991).

O P-solúvel no solo quer seja proveniente de rochas fosfatadas (apatitas), fertilizantes, resíduos orgânicos ou da matéria orgânica, tenderá a formar compostos com cálcio, ferro e alumínio em função da baixa solubilidade desses compostos de fósforo. Também pode se ligar às superfícies reativas de certos minerais de argila, óxidos de ferro e de alumínio. Todas essas interações do P tendem a reduzir sua disponibilidade para as plantas em função da estabilidade química dessas reações (STEVENSON, 1986).

A camada arável dos solos agrícolas pode conter grandes quantidades de P total, mas as formas solúveis e disponíveis constituem-se em uma pequena fração, usualmente menor que 3 kg ha^{-1} . A disponibilidade de P para as plantas é, portanto, função do equilíbrio entre P-solução, P-lábil e P-não lábil, sendo P-lábil representado pelas formas do nutriente que podem ser disponibilizadas para a solução do solo com a finalidade de manter o equilíbrio entre elas. O P-não lábil, por sua vez, representa a fração de P de disponibilidade muito baixa constituindo-se de formas insolúveis do nutriente. Fosfatos ligados a Fe ou a Al podem ser lábeis ou não lábeis dependendo das condições do solo e do tempo de formação desses compostos (SANCHEZ; UEHARA, 1980; RAIJ, 1991). Fosfatos de Fe ou de Al recém precipitados podem se tornar disponíveis para os vegetais mas a medida que essas ligações entre o PO_4^{3-} e esses metais “envelhecem” a solubilidade e conseqüentemente a disponibilidade do P é reduzida.

Quase todo o fósforo movimenta-se no solo por difusão, um processo lento e de pouca amplitude, que depende da umidade. De acordo com Novais; Smyth (1999) sob condições normais de umidade do solo o P movimenta-se cerca de $0,013 \text{ mm dia}^{-1}$ do local onde se encontra. Isso representa que num ciclo de aproximadamente 365 dias o fósforo aplicado num determinado local teria se movimentado menos de 5 mm. Decorre deste fato a necessidade de que todo o volume de solo explorado pelas raízes se apresente adequadamente suprido em fósforo.

De acordo com Lopes (1998) a maioria das culturas recupera de 10 a 30% do fósforo dos fertilizantes durante o primeiro ano após a aplicação sendo que a disponibilidade do nutriente depende de várias condições: quantidade e tipo de argilas; tempo de contato entre o P e os colóides do solo; aeração, umidade e temperatura do solo; compactação; teor de P no solo;

interação com outros nutrientes e em especial com N-NH_4^+ , cálcio, enxofre e zinco; espécie vegetal e pH.

A incorporação de resíduos orgânicos no solo como fonte de P ou associada a um adubo fosfatado traz como vantagens, além da adição do nutriente ao solo a um custo menor, reduzir as reações de fixação do P em compostos de Fe e de Al devido à complexação desses metais por substâncias orgânicas (SOMMERS; SUTTON, 1980).

3.2.1.2 Lodo de esgoto como fonte de fósforo

Tendo em vista a complexa gama de reações que controlam a disponibilidade do fosfato no solo será discutido brevemente a utilização do lodo de esgoto (LE) como fonte do nutriente e suas implicações agronômicas e ambientais.

Inicialmente, devem-se considerar alguns aspectos relativos à natureza do fosfato presente no LE. Durante o tratamento das águas servidas parte do P é removido por meio de precipitação com sulfato de alumínio, cloreto férrico ou hidróxido de cálcio com uma eficiência que pode variar de 70 a 98% (WILLIANS; COKER, 1980). Mesmo assim, certa quantidade desse elemento é preservada e acaba sendo incorporada ao lodo residual. Dessa forma o fósforo presente no lodo de esgoto apresenta-se com uma fração orgânica e outra inorgânica em proporções definidas pelo tipo de tratamento dispensado ao mesmo.

Para efeito ilustrativo, Sommers et al. (1976) verificaram que 70 a 90% do P total presente no lodo de esgoto está na forma inorgânica. Frossard et al. (1996) caracterizando o conteúdo e a forma do P em 12 lodos de esgoto relataram que os teores de P-orgânico variaram entre 10 e 29% do P-total. Sarkar e O'Connor (2004) fracionando formas de P presente em três diferentes lodos de esgoto verificaram que o P inorgânico variou de 75 a 83% do conteúdo total. Por outro lado, Andrade (2004) fracionando essas formas de P em diferentes lodos de esgoto observou que o conteúdo de P-inorgânico variou, conforme a origem do resíduo, de 28 a 76% do P-total. Convém salientar que esses resultados foram obtidos por diferentes metodologias de fracionamento o que representa uma fonte adicional de variação. O P-orgânico precisa ser mineralizado para se tornar disponível as plantas e o componente inorgânico, que a primeira vista aparenta ser sinônimo de “P prontamente disponível”, de maneira geral, está associado ao ferro e ao alumínio que são formas de P de menor solubilidade e disponibilidade (SARKAR; O'CONNOR, 2004).

São poucos os estudos que avaliaram o LE como fonte de P para as plantas. Melo e Marques (2000) compararam a eficiência de um lodo de esgoto como fonte de P frente a um adubo fosfatado solúvel em água e observaram que o resíduo forneceu de 20 a 80% do fósforo absorvido. A esse respeito Boaretto (1986) verificou que a quantidade de P absorvida por plantas de soja e arroz fertilizadas com lodo de esgoto foi de 37 a 82% e de 21 a 52% respectivamente, tendo o superfosfato simples como padrão (100%). O autor relatou, ainda, que a complementação do lodo de esgoto com 10 a 20% da dose de P na forma mineral foi superior, em termos de quantidade de P absorvida, ao superfosfato aplicado isoladamente. Silva et al. (2002) também relataram que o lodo de esgoto apresentou eficiência 25% superior ao superfosfato triplo como fonte de P para o milho.

Trabalhando com lodo de esgoto líquido digerido Kelling et al., (1977a) e Kelling et al., (1977b) verificaram aumentos significativos nos teores de P disponível no solo (extraído com solução HCl 0,025 mol L⁻¹ + NH₄F 0,03 mol L⁻¹, Bray-1) que decresceram com o tempo devido às reações de fixação de P nos colóides do solo. Houve também aumentos na absorção de P pelas plantas (centeio, sorgo e milho), porém apenas de 3 a 7% do total do nutriente aplicado foi recuperado pelos cultivos sucessivos das diferentes espécies vegetais.

O'Connor et al. (2004) compararam a capacidade de fornecimento de fósforo do superfosfato simples com a de 12 lodos de esgoto, de diferentes origens e características químicas, em um experimento com gramínea. Os autores constataram que a fitodisponibilidade de P esteve ligada às características químicas dos lodos podendo, os mesmos, serem agrupados em categorias distintas quanto a sua capacidade em fornecer o nutriente às plantas. Lodos com elevado conteúdo de Fe e Al foram os que apresentaram as menores quantidades de P disponibilizadas. Isso pode indicar também, que mesmo que o lodo de esgoto forneça fósforo em quantidades suficientes para suprir a demanda das culturas pelo nutriente, paralelamente pode ocorrer imobilização do mesmo devido à ligação de P com Fe e Al (MAGUIRE et al., 2000).

Por sua vez, Munhoz (2001) verificou aumentos nos teores foliares de P em milho que recebeu o nutriente via lodo de esgoto. O autor verificou uma resposta linear e significativa entre dose de P via LE e o conteúdo foliar. Simonete et al. (2003) também obtiveram resultados similares estudando milho cultivado em um Argissolo tratado com doses de lodo de esgoto (0, 10, 20, 30, 40 e 50 t ha⁻¹, base seca), proveniente da ETE de Piracicaba (SP), (digerido anaerobicamente e sem qualquer condicionamento químico para desidratação) complementado

com fontes minerais de fósforo e potássio. Os autores observaram aumento nos teores de P disponível no solo com as doses de LE e aumentos na absorção do nutriente pelas plantas. Galdos et al. (2005) também relataram aumentos nos teores de P nas folhas de milho cultivado com doses (0, 10 e 20 t ha⁻¹) de LE num Latossolo Vermelho por dois anos.

Esses resultados são contrários aos verificados por Anjos (1999). O autor cultivou milho em vasos com capacidade para 0,5 m³ de terra preenchidos com dois solos (Latossolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho) tratados com dose equivalente a 388 t ha⁻¹, base seca, de LE. Em termos totais foi aplicado nesses vasos o equivalente a cerca de 500 mg kg⁻¹ de P e mesmo assim foram observados severos sintomas foliares de deficiência do nutriente nos dois solos. Corrêa (2004) também estudou a capacidade de cinco diferentes lodos de esgoto em fornecer N e P para a cultura do azevém em dois solos (Espodossolo e Oxissolo) e observou que não houve correlação significativa entre os teores de P-total e P-disponível aplicados ao solo via lodo de esgoto e a produção de matéria seca. Houve uma maior liberação de P em formas prontamente disponíveis nas primeiras 16 semanas após a aplicação dos resíduos com redução gradual da disponibilidade dos mesmos para os cultivos subseqüentes. Aproximadamente 93% do P adicionado ao Oxissolo por meio dos lodos de esgoto não foram absorvidos pelos cultivos de azevém, permanecendo no solo.

3.2.1.3 Fracionamento de P em solos tratados com lodo de esgoto

O lodo de esgoto, como discutido nos itens anteriores, é aplicado ao solo em função de seu conteúdo de N. O'Connor et al. (2004) chamam a atenção para a estreita relação N/P encontrada nos lodos de esgoto dos EUA, resultando, invariavelmente, na aplicação de uma dose de P muito maior que a requerida pela maioria das culturas. Isso seria muito benéfico para os solos brasileiros, bastante intemperizados, naturalmente muito pobres em P e com elevada capacidade de adsorção deste nutriente. Entretanto, é importante destacar que os lodos de esgoto produzidos no Brasil apresentam teores de P total (6 a 8 g kg⁻¹) muito menores que os verificados nos lodos produzidos nos EUA (aproximadamente 20 g kg⁻¹). Mesmo assim, devido à concentração de N também ser menor nos LE brasileiros tem-se, em média, uma razão N/P da ordem de 2:1.

As aplicações de lodo de esgoto nos solos podem alterar a dinâmica das formas de P dada a elevada carga orgânica e a quantidade de outros elementos, em especial ferro, alumínio, cálcio e magnésio, que também é introduzida no sistema (HUE, 1995).

Existem muitos esquemas de fracionamento de P no solo sendo os mais citados e utilizados os descritos por Chang; Jackson (1957) e por Hedley et al. (1982). O fracionamento é, basicamente, o emprego seqüencial de soluções extratoras em uma mesma amostra de terra com o intuito de extrair formas cada vez mais estáveis de P.

Para estudos específicos de fracionamento de P em solos fertilizados com lodo de esgoto encontram-se os métodos propostos por Rydin; Otabbong (1997), Sui et al. (1999) e por Sarkar; O'Connor (2004). Rydin; Otabbong (1997) estudaram a liberação de P de dois lodos de esgoto (um com 160 g kg^{-1} de Fe e o outro com 36 g kg^{-1} de Al e 21 g kg^{-1} de Fe, ambos com cerca de 30 g kg^{-1} de P total) em três solos da Suécia com teores de areia variando entre 1 e 76%, em dose de 50 g kg^{-1} , base seca. Os autores utilizaram como extratores de P-lábil, P-Fe + Al e P-Ca, respectivamente, $\text{NH}_4\text{Cl } 1 \text{ mol L}^{-1}$, $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e $\text{HCl } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e observaram que 20-40% do P total estava presente em formas fitodisponíveis. O fracionamento das formas de P mostrou que houve significativo decréscimo nos teores de P-Fe + Al após um período de incubação de 70 dias, resultado do “envelhecimento” das ligações do elemento com esses metais. Nesse estudo foram simulados 700 mm de chuva para a análise de P na água lixiviada. Os tratamentos com lodo de esgoto com maior teor de Fe apresentaram uma liberação de cerca de 20% do P-lábil enquanto o no tratamento de lodo com maior teor de Al esse valor foi de 35%, demonstrando a importância em se conhecer as formas nas quais o P se apresenta no solo.

Sui et al. (1999) avaliaram as transformações nas formas de P em um Mollisol (216 g kg^{-1} de areia; 412 g kg^{-1} de argila) tratado durante seis anos com lodo de esgoto (22 g kg^{-1} de P-total) digerido anaerobicamente. Os autores utilizaram os seguintes extratores: água deionizada (P- H_2O); $\text{NaHCO}_3 \text{ } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (P- NaHCO_3); $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (P- NaOH); $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (P- HCl) e $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ (P-residual), relação solo-solução 1:60 (m/v). Houve aumentos significativos em todas as formas de P com a aplicação de lodo de esgoto na camada de 0-5 cm de profundidade. Também foi observado um aumento nos teores de P- H_2O e P- NaHCO_3 no solo tratado com lodo de esgoto em taxas desproporcionais às suas respectivas concentrações no resíduo, indicando, segundo os autores que formas mais estáveis, P- HCl , estariam sendo transformadas em formas mais lábeis.

Sui; Thompson (2000) fracionando o P em amostras de solo tratado com LE concluíram que a quantidade de P que pode ser dessorvida do solo aumentou com a aplicação de lodo, com aumentos nos teores de P extraível em água, em bicarbonato, em solução alcalina e em HCl.

Munhoz (2001) tratando um Latossolo Vermelho com doses de dois LE (Franca e Barueri, respectivamente com 21 e 31 g kg⁻¹ de P-total) também verificou aumento das frações mais lábeis (extraídas com CaCl₂ e NaHCO₃) e moderadamente lábeis de P (P-NaOH).

Em um experimento realizado em dois solos arenosos, pH 5,3-5,6, na Flórida/EUA, Sarkar; O'Connor (2004) fracionaram o P inorgânico dos solos e do lodo de esgoto em: P-disponível, P-ligado a Fe + Al e P-ligado a Ca + Mg, respectivamente extraídos com KCl 1,0 mol L⁻¹; NaOH 0,1 mol L⁻¹ e HCl 0,5 mol L⁻¹, relação solo-solução 1:20 (m/v). A absorção de P pela gramínea cultivada (*Paspalum* spp.) foi maior nos tratamentos que receberam adubo fosfatado e nos tratamentos com lodo de esgoto com maior teor de P-KCl. Os lodos com as maiores concentrações de Fe + Al (> 90% do P-total) foram os que proporcionaram as menores absorções de P devido à lenta disponibilidade dessas formas de P e ao aumento do teor de óxidos amorfos de Fe e de Al, que apresentam grande capacidade de adsorver o nutriente.

Galdos et al. (2005) trabalhando com Latossolo Vermelho tratado com lodo de esgoto digerido, aeróbio e condicionado com polieletrólito (cerca de 7 g kg⁻¹ de P total) em doses de 0, 10 e 20 t ha⁻¹ aplicadas anualmente em dois cultivos de milho verificaram que os teores disponíveis de P (extraídos com resina de troca catiônica) nos tratamentos com lodo foram semelhantes aos dos tratamentos sem lodo e com adubação mineral. O fracionamento das formas de P no solo, seis meses após a aplicação do LE, entretanto, mostrou que a aplicação do resíduo aumentou as frações lábeis (P-NaHCO₃) e moderadamente lábeis (P-NaOH). Esse efeito, contudo, foi observado apenas na camada de 0-0,05 m sendo que o LE havia sido incorporado a 0,1 m de profundidade.

3.2.1.4 Importância do fósforo para a cana-de-açúcar

Para a cultura da cana-de-açúcar o fósforo é um elemento extraído em quantidades menores que outros nutrientes e a ordem de extração tanto para a cana-planta quanto para as soqueiras, segundo Orlando Filho (1983) é K > N > Ca > Mg > P. Apesar de ser exportado em pequenas quantidades o P desempenha um importante papel nas etapas de industrialização do caldo nas etapas de clarificação e na fermentação alcoólica (MACHADO, 1987).

Segundo Dillewijn (1952) o maior conteúdo de P na cana ocorre nos centros de maior atividade da planta com as regiões de crescimento e assimilação de carbono. Humbert (1968) apresentou a seguinte ordem decrescente de concentração de P na cana-de-açúcar: tecidos meristemáticos, colmos em elongação, folhas jovens, folhas velhas e colmos maduros. Neste

sentido, verifica-se que conforme os tecidos aumentam de idade apresentam quantidades menores de P.

Hart; Burr apud ORLANDO FILHO (1983) verificaram que a deficiência de P nos dois primeiros meses de idade diminuiu a atividade fotossintética da cana mais do que a deficiência de N ou K.

De acordo com Alexander (1973) o fósforo tem importante papel na formação da sacarose: glicose 1-fosfato + frutose \rightarrow sacarose + H_3PO_4 .

Com relação ao conteúdo de P no caldo para Hugot (1977) o teor ideal é de 131 mg L^{-1} de P. No Brasil, contudo, Silva (1983) encontraram teores de fosfatos em caldos variando de 22 a 61 mg L^{-1} de P. Nas folhas de cana, segundo Raij et al (1997), a faixa de teores de P considerada adequada é de 1,5 a $3,0 \text{ g kg}^{-1}$.

Visto o exposto, apesar da importância do fósforo na fertilidade do solo e na nutrição das plantas poucos estudos têm buscado entender a sua disponibilidade e as transformações das formas de P nas áreas que recebem resíduos urbanos e em especial lodo de esgoto.

3.2.2 Material e métodos

3.2.2.1 Descrição da área experimental

O presente estudo foi realizado em uma área fornecida pela Fazenda Boa Esperança, localizada no município de Capivari (SP), de propriedade do Sr. Arlindo Batagin Jr. O clima na cidade de Capivari é do tipo Cwa (classificação de Köppen), tropical úmido, com inverno seco e verão quente e úmido e os dados referentes à temperatura e pluviosidade, entre outros, podem ser vistos na Figura 20. Considerando o período de março de 2003 a agosto de 2004, o volume total de precipitação pluviométrica foi de 1318 mm (CIIAGRO, 2004).

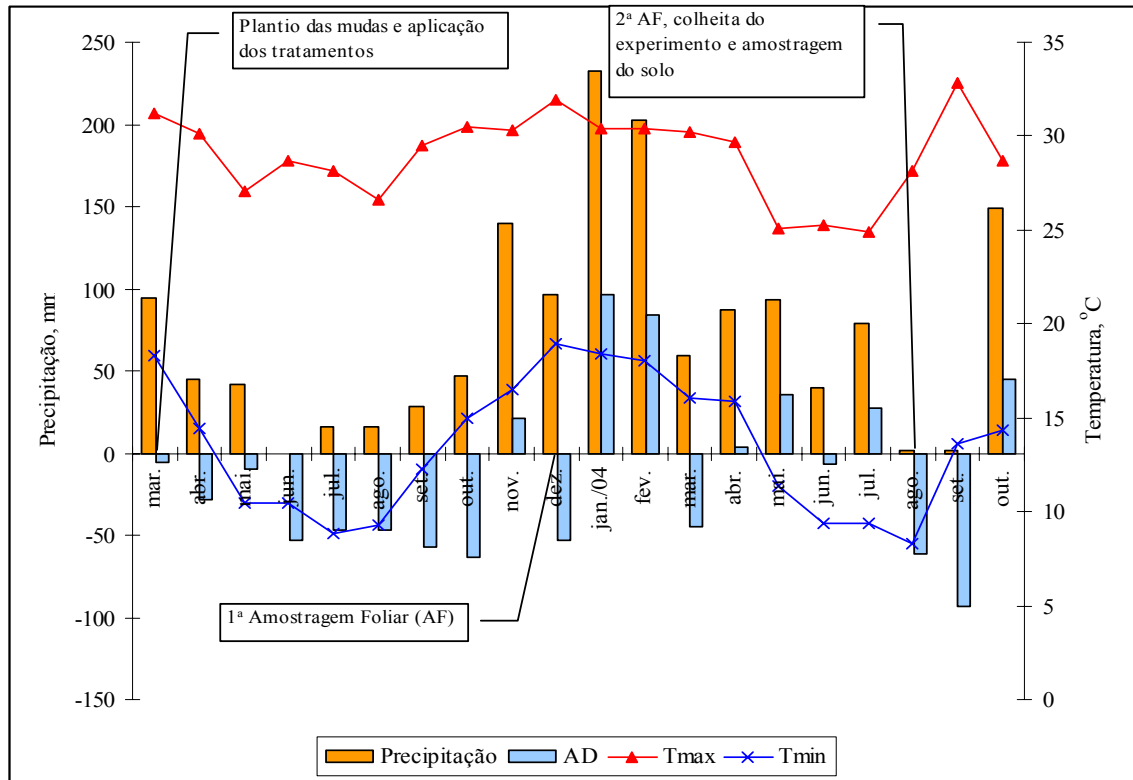


Figura 20 - Precipitação pluviométrica, água disponível (AD = precipitação – evapotranspiração), temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) registradas em Capivari (SP) durante o período experimental

O solo foi classificado como sendo um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) segundo classificação da EMBRAPA (1999) e suas principais características químicas podem ser observadas na Tabela 10. A cultivar utilizada neste experimento foi a SP83-2847 que apresentava um bom histórico de desempenho na região.

Tabela 10 – Características químicas¹ e físicas² do solo na área experimental

Prof.	pH CaCl ₂	C-org	P _{resina}	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V
m		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³							%
0-0,2	4,5	3	4	0,3	13	5	2	18	18	36	50
0,2-0,4	4,4	3	1	0,3	14	5	4	22	19	41	47
Prof.	Argila	Silte	Areia grossa	Areia fina	Fe ₂ O ₃ ⁽³⁾	Al ₂ O ₃ ⁽³⁾	SiO ₂ ⁽³⁾				
m	g kg ⁻¹										
0-0,2	149	255	37	559	15,43	25,60	52,70				
0,2-0,4	130	331	30	509	13,78	38,40	87,40				

⁽¹⁾RAIJ et al. (2001); ⁽²⁾CAMARGO et al. (1986). 2 mm ≥ Areia grossa > 0,5 mm ≥ Areia fina > 0,05 mm ≥ Silte > 0,002 mm ≥ Argila

3.2.2.2 Tratamentos e delineamento estatístico

As parcelas experimentais constituíram-se de uma área retangular com 10 metros de comprimento e 8,4 metros de largura (equivalente a sete linhas de cana espaçadas de 1,4 m) e um esquema das mesmas pode ser melhor visualizada no apêndice A. Como área útil de cada parcela foram consideradas as três linhas centrais descontando-se 1 metro em cada extremidade das linhas. Foram estabelecidos sete tratamentos distribuídos em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições e constituídos de uma dose de lodo de esgoto (LE) suficiente para fornecer 60 kg ha⁻¹ de N associada a cinco doses de adubo fosfatado (0, 45, 90, 135 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e dois tratamentos adicionais: adubação mineral (60 kg ha⁻¹ de N, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 150 kg ha⁻¹ de K₂O) e um tratamento controle, sem adubação (Tabela 11).

Tabela 11 – Tratamentos

Tratamentos	Componentes
T1	Controle (sem adubação)
T2	Adubação Mineral – AM (180 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 60 kg ha ⁻¹ de N + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O)
T3	LE ¹ + 0 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T4	LE + 45 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T5	LE + 90 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T6	LE + 135 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O
T7	LE + 180 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ + 150 kg ha ⁻¹ de K ₂ O

⁽¹⁾ A dose de LE de 8,2 t ha⁻¹ foi calculada para fornecer 60 kg ha⁻¹ de N (TMN = 28%) e resultou num aporte de 131,3 kg ha⁻¹ de P₂O₅

As fontes minerais de N, P e K foram nitrato de amônio (32% N), superfosfato triplo (SFT) com 42% de P₂O₅ e cloreto de potássio (58% K₂O) na forma de adubos comerciais.

3.2.2.3 Lodo de esgoto utilizado

O lodo de esgoto foi obtido junto à Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ), localizada no município de Jundiaí (SP) e é resultante do tratamento biológico e aeróbio do esgoto sanitário por sistema conhecido como Lagoas Aeradas de Mistura Completa Seguidas de Lagoas de Decantação. O lodo é retirado do fundo das lagoas de decantação com uma idade média de um ano e com 2% de sólidos. A seguir esse lodo recebe a adição de polímeros catiônicos e após

centrifugação passa a conter de 18 a 20% de sólidos. Na seqüência o lodo é encaminhado para um sistema de secagem adicional ao ar com revolvimento mecânico por cerca de 120 dias resultando em um resíduo com aproximadamente 40% de sólidos e com uma redução significativa de patógenos. Suas características químicas estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Atributos do lodo de esgoto utilizado. Valores com base na matéria seca

Atributos ¹	Valor
Umidade à 65°C, g kg ⁻¹	649
N total, g kg ⁻¹	26,10
N inorgânico, g kg ⁻¹	0,70
P, g kg ⁻¹	7,00
K, g kg ⁻¹	1,4
Ca, g kg ⁻¹	8,3
Mg, g kg ⁻¹	1,5
C-orgânico, g kg ⁻¹	265,2
pH (H ₂ O)	6,1
Mn, mg kg ⁻¹	696
Cu, mg kg ⁻¹	976
Cr, mg kg ⁻¹	195
Cd, mg kg ⁻¹	10
Ni, mg kg ⁻¹	44
Zn, g kg ⁻¹	21,6
Fe, g kg ⁻¹	23,0
Al, g kg ⁻¹	20,5
Pb, mg kg ⁻¹	191

⁽¹⁾Determinados de acordo com EPA (1986)

3.2.2.4 Cálculo da dose de lodo de esgoto

A dose de lodo de esgoto foi calculada para fornecer o equivalente a 60 kg/ha de N seguindo a recomendação de adubação para a cultura (Raij et al. 1997) e foi determinada em função do conteúdo de N disponível no resíduo (N_{LE}) e da taxa de mineralização do nitrogênio (TMN).

$$\text{Dose de N} = \text{Necessidade de N pela cultura} / (\text{TMN} \times \text{N}_{\text{LE}})$$

Assim, considerando uma taxa de mineralização do N de 28% foram estimadas as doses de lodo de esgoto igual a 8,2 t/ha (com base no material seco) ou 23 t/ha do resíduo úmido.

3.2.2.5 Instalação e condução dos experimentos

O solo foi corrigido com a aplicação de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 67%) e após aração, gradagem e sulcação do solo, foram aplicados no fundo do sulco de plantio o lodo de esgoto (8,2 t ha⁻¹, base seca) e os adubos conforme os tratamentos. O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em 27/03/2003 com toletes fornecidos pela Fazenda Boa Esperança mantendo-se cerca de 15-16 gemas por metro linear de sulco.

No tratamento que recebeu adubação mineral, no plantio foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de N e 100 kg ha⁻¹ de K₂O. Foi realizada uma adubação de cobertura aos 50 dias após o plantio aplicando-se mais 30 kg ha⁻¹ de N e 50 kg ha⁻¹ de K₂O utilizando os mesmos adubos empregados no plantio. O N foi aplicado apenas no tratamento AM enquanto o K foi adicionado em todas as parcelas experimentais.

A colheita do experimento foi realizada em 05/08/2004 quando as plantas completavam 497 dias ou 16,5 meses de cultivo. A produção de colmos foi medida por pesagem de todos os colmos produzidos dentro da área útil de cada parcela experimental. A colheita foi realizada na cana crua, sem despalhe por queima, e os colmos foram pesados com auxílio de um dinamômetro acoplado a uma carregadora de cana. Com a produção de cada parcela fez-se uma estimativa da produtividade em toneladas de cana por hectare (TCH).

3.2.2.6 Amostragem e análise do solo

Para as análises de fertilidade do solo e quantificação de metais pesados presentes foram coletadas amostras de terra nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m seguindo esquema proposto por Mattiazzo (1982) para solos cultivados com cana-de-açúcar. Dentro da área útil de cada parcela experimental obteve-se uma amostra composta formada por mistura e homogeneização de seis amostras simples, sendo cinco coletadas na entrelinha e uma na linha de cultivo.

Após a coleta, as amostras compostas de terra foram divididas em duas porções. Uma foi congelada a 20°C negativos para as quantificações de nitrogênio enquanto a outra foi seca ao ar, destorroada, passada em peneira de 2 mm de malha resultando na chamada “terra fina seca ao ar” (TFSA) e reservada para as análises dos atributos químicos de fertilidade do solo, segundo metodologia de Raij et al. (2001). A condutividade elétrica do solo foi medida em suspensão de solo:água (1:1).

3.2.2.7 Extração e quantificação de nitrogênio (N-total e N-inorgânico) em solos

A determinação dos teores de N-total no solo foi realizada conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A extração e quantificação do N-inorgânico foi realizada segundo metodologia descrita por Mulvaney (1996). O teor de N-inorgânico foi determinado pela soma dos teores de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ e o teor de N-orgânico foi determinado por diferença entre o N-total e N-inorgânico.

3.2.2.8 Determinação da CTC

A CTC efetiva ao pH natural do solo (CTC_e) foi determinada segundo a metodologia proposta por Gillman; Sumpter (1986). A determinação da CTC a pH 7 (CTC_7) foi realizada de acordo com metodologia adaptada de Glória et al. (1965). A CTC calculada (CTC_c) foi estimada pelo somatório de cátions trocáveis. Foram utilizadas amostras da camada de 0-0,2 m de profundidade por se entender que esta seria mais alterada em função da aplicação do LE.

As quantificações de Mg e Ca foram realizadas por espectrometria de absorção atômica.

3.2.2.9 Extração dos teores totais de P e metais pesados (Cd, Cr, Ni e Pb) no solo

A quantificação dos teores totais dos elementos nas amostras de terra foi realizada empregando a metodologia descrita por Sastre et al. (1999) para uso em estudos ambientais. As amostras de TFSA foram trituradas em almofariz, pesou-se 1,0 g de amostra e esta foi deixada em pré-digestão em temperatura ambiente por 16 horas com 10 mL de *aqua-regia* (3 HCl: 1 HNO_3). As amostras foram, então, digeridas a 95° C por 2 horas sob refluxo. As amostras foram filtradas e o volume foi acertado para 50 mL, em balão volumétrico, com solução de HNO_3 0,5 mol L^{-1} . A quantificação dos teores dos analitos nos extratos foi realizada por ICP-AES.

3.2.2.10 Extração de Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis no solo

Os teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn foram avaliados com o extrator DTPA pH 7,3 de acordo com a metodologia proposta por Abreu e Andrade (2001) A quantificação desses metais foi realizada por ICP-AES. Foram utilizadas amostras da camada de 0-0,2 m de profundidade por se entender que esta seria mais alterada em função da aplicação do LE.

Os teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn foram avaliados com o extrator DTPA pH 7,3 de acordo com a metodologia proposta por Abreu; Andrade (2001).

3.2.2.11 Fracionamento de fósforo do solo

No estudo de fracionamento de P, analisaram-se apenas as amostras referentes à camada de 0-0,2 m, uma vez que o LE foi incorporado em uma profundidade de aproximadamente 0,2 m e que o P é considerado um elemento pouco móvel no solo permanecendo no local onde foi aplicado. Para realizar o fracionamento das formas de P utilizou-se o método descrito por Sarkar; O'Connor (2004). Este método permite a quantificação do P nas seguintes frações: prontamente disponível (P-KCl); associado a Fe + Al (P-NaOH) e associado a Ca + Mg (P-HCl). Em tubos de centrífuga de 50 mL foi pesado 1,0 g de TFSA e adicionada solução de KCl 1 mol L⁻¹. As amostras foram agitadas a 250 rpm em agitador horizontal por 2 horas, centrifugadas a 2012g por 10 minutos e filtradas (P-KCl). Na seqüência, ao resíduo que permaneceu no fundo dos tubos de centrifuga foram adicionados 20 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹, agitadas a 250 rpm em agitador horizontal por 16 horas, centrifugadas a 2012g por 10 minutos, filtradas e acidificadas com 2 gotas de H₂SO₄ concentrado com *p-nitrofenol* como indicador para precipitar compostos orgânicos e obter um extrato límpido (P-NaOH). Ao resíduo dessa extração foram adicionados 20 mL de HCl 0,5 mol L⁻¹ e as amostras foram novamente agitadas a 250 rpm em agitador horizontal por 24 horas, centrifugadas a 2012g por 10 minutos e filtradas (P-HCl). O teor de P-inorgânico total (PiT) foi obtido pela soma dos teores de P-KCl, P-NaOH e P-HCl. O P-orgânico foi estimado pela diferença entre o teor de P-total (obtido conforme o item 3.2.2.9) e o PiT.

Além do fracionamento dessas formas de P foi determinado o teor disponível do nutriente pelo extrator H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ (CATANI; JACINTHO, 1974). A quantificação dos teores de P nos extratos foi realizada por colorimetria conforme metodologia de Murphy; Riley (1962).

3.2.2.12 Parâmetros tecnológicos do caldo

Foram coletados seis colmos dentro da área útil de cada parcela, despalhados, despontados, triturados e uma sub-amostra de 500 g foi prensada em prensa hidráulica de acordo com metodologia de Sturion; Fernandes (1979) e César; Silva (1993), obtendo-se deste modo o caldo extraído (CEx) e o bagaço fibroso. Foram determinados: Sólidos Solúveis Totais (Brix % CEx); Pol % CEx; Pureza do CEx (PZA); Peso úmido do bagaço fibroso (PUBF); Peso seco do bagaço fibroso (PSBF); Açúcares redutores % CEx (AR % CEx); Porcentagem de fibra da cana

(Fibra % cana); Pol % da cana (PCC); Açúcares redutores % cana (AR % cana); Açúcar Total Recuperável (ATR); segundo a fórmula da Consecana (1999) e Toneladas de Açúcar por Hectare (TAH), em t ha⁻¹.

A composição química do caldo foi determinada em extrato obtido de uma alíquota de 50 mL do caldo que foi pré-concentrada em cadinhos de porcelana até a eliminação total de água e incinerada a 500° C por duas horas em mufla elétrica com posterior solubilização das cinzas com 25 mL de HCl 6 mol L⁻¹. O teor de N-inorgânico no caldo foi determinado conforme metodologia de Beauclair (1994), destilando uma alíquota in-natura do caldo sem digestão prévia da matéria orgânica.

3.2.2.13 Amostragem e análise foliar

Para avaliar a nutrição das plantas foram coletadas 15 folhas +1 – TVD, segundo sistema de ordenação de Kuijper das plantas dentro da área útil de cada parcela preservando os 20 cm centrais de cada folha e descartando-se a nervura central (Raij et al. 1997). Foram realizadas duas amostragens por safra, aos 10 meses após o plantio e no dia da colheita (16,5 meses). As folhas foram lavadas em água corrente, em solução diluída de detergente (0,1%), novamente em água corrente e outras duas vezes em água destilada, colocadas para secar em estufa de circulação forçada de ar à 65° C por 72 horas e moídas em moinho tipo Wiley.

Para as determinações dos demais nutrientes e metais pesados utilizou-se a metodologia proposta por Abreu (1997). Cerca de 0,500 g de amostra foram pesados e receberam 4 mL de H₂O₂ 30 v. + 2 mL de HNO₃ p.a. concentrado permanecendo em pré-digestão por 8 horas após o qual foram digeridas em forno de microondas conforme programa constante do apêndice B.

As quantificações de potássio foram realizadas por fotometria de chama; o fósforo foi determinado colorimetricamente (MURPHY; RILEY, 1962) e Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni e Pb foram realizadas por ICP-AES e as melhores linhas espectrais estão no apêndice C.

3.2.2.14 Forma de análise dos resultados

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A análise estatística foi realizada com auxílio do pacote estatístico SAS v.6 (SAS, 1989).

3.2.3 Resultados e discussão

3.2.3.1 Alterações nos atributos do solo

Na Tabela 13 podem ser observadas as quantidades de nutrientes e metais pesados adicionados ao solo considerando a dose de lodo de esgoto utilizada.

Tabela 13 - Aporte de nutrientes e metais pesados ao solo com a aplicação de 8,2 t ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca)

	kg ha ⁻¹
N total	214,02
N inorgânico	4,64
P total	57,40
K total	11,48
Ca total	68,06
Mg total	12,30
Na total	4,10
C-orgânico	2174,64
Cu total	8,01
Fe total	194,34
Mn total	5,71
Zn total	17,71
Cd total	0,08
Cr total	1,60
Ni total	0,37
Pb total	1,57

Dentre os metais pesados as maiores quantidades adicionadas foram de cromo e chumbo. Estes valores, entretanto, estão de acordo com os estabelecidos pela norma P4.230 da CETESB (CETESB, 1999) que regula a aplicação de lodo de esgoto no estado de São Paulo. Convém destacar também os valores apresentados de fósforo. Em termos totais esse aporte de P significa mais de 70% da dose recomendada em função dos teores de P no solo e da produtividade esperada (100-150 t ha⁻¹).

3.2.3.2 Fertilidade do solo

Nas duas profundidades avaliadas não houve efeitos dos tratamentos para os atributos do solo avaliados, exceção para o cálcio e o magnésio (Tabela 14). Com relação ao pH e acidez potencial (H+Al) não eram esperados efeitos significativos dos tratamentos pelo fato de ter sido feito calagem adicionando 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico.

Tabela 14 - Atributos químicos do solo em função da aplicação de lodo de esgoto e adubo fosfatado. Valores médios de quatro repetições

Profundidade de 0-0,2 m								
	pH	C.Org. mg kg ⁻¹	P (resina) mg dm ⁻³	K	Ca mmolc dm ⁻³	Mg	H+Al	CE dS m ⁻¹
Controle	5,7	4,75	4,50	0,3	24a	12	11,25	0,10
Ad. Mineral	5,1	5,50	8,25	0,6	18a	9	15,25	0,12
LE + 0 P	5,2	5,75	6,25	0,5	14a	8	15,25	0,11
LE + 45 P	5,2	5,25	8,05	0,6	21a	11	14,25	0,10
LE + 90 P	5,2	6,50	12,50	0,6	16a	8	14,50	0,11
LE + 135 P	5,2	5,50	10,25	0,5	20a	10	14,00	0,10
LE + 180 P	5,1	6,25	14,35	0,5	14a	7	14,50	0,10
CV (%)	5,32	22,68	94,37	40,95	30,85	30,86	20,05	20,30
Profundidade de 0,2-0,4 m								
Controle	5,6	3,55	3,50	0,3	31a	12a	12,50	0,09
Ad. Mineral	5,0	4,25	6,50	0,3	24ab	9ab	16,50	0,13
LE + 0 P	4,9	3,85	2,25	0,4	17b	9ab	19,75	0,11
LE + 45 P	4,9	3,95	6,75	0,5	24ab	11a	19,25	0,15
LE + 90 P	5,2	4,00	3,75	0,3	20ab	9ab	14,75	0,12
LE + 135 P	4,8	4,25	6,00	0,4	19ab	9ab	18,25	0,11
LE + 180 P	5,0	5,00	4,25	0,3	18ab	7b	15,25	0,12
CV (%)	7,69	23,30	66,83	44,59	25,43	16,27	26,99	25,21

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Alguns experimentos têm mostrado que os incrementos nos teores de carbono orgânico em solos tratados com lodos de esgoto são variáveis e inconsistentes. Ao mesmo tempo em que são encontrados aumentos nos teores de carbono com a aplicação de doses de LE (OLIVEIRA et al., 2002; SIMONETE et al., 2003) outros autores relatam que a aplicação do resíduo não alterou o conteúdo de C do solo (SILVA, 1995; MARQUES, 1996).

Além da dose de LE, que evidentemente acarreta maior ou menor aporte de C no solo, a taxa de degradação desse resíduo tem se mostrado elevada. Estudos de respirometria conduzidos

em laboratório têm demonstrado que a degradação do carbono do lodo de esgoto ocorre em duas etapas principais: uma primeira fase de curta duração, com cerca de 7 dias, com intensa oxidação de substâncias orgânicas facilmente degradáveis seguida de uma etapa mais lenta, de 63 dias, de estabilização de compostos orgânicos recalcitrantes (ANDRADE, 2004). Oliveira et al. (2002) verificou que após um ano da aplicação de doses de LE (66 e 99 t ha⁻¹) num Latossolo Vermelho a taxa de decréscimo nos teores de C foi igual a 65 e 73%, respectivamente para cada dose.

Trabalhando com solo tratado com três doses de composto de lodo de esgoto (6,6, 19,7 e 59 t ha⁻¹) Korboulewsky et al. (2002) relataram aumentos nos teores de carbono dois meses após a aplicação do resíduo. Esse efeito durou até os 18 meses momento a partir do qual os teores de C estabilizaram nos mesmos patamares em todos os tratamentos independentemente das doses inicialmente aplicadas. Desse modo, a aplicação de 8 t ha⁻¹ de LE no plantio da cana-de-açúcar não foi suficiente para alterar significativamente o teor de carbono no solo em comparação ao tratamento AM.

Os elevados coeficientes de variação observados para o fósforo disponível dificultam maiores considerações a respeito desse nutriente. O esquema de amostragem adotado subestimou a interferência da aplicação de LE e adubos no sulco de plantio. Das seis amostras simples coletadas por parcela, uma foi retirada da linha de plantio, e provavelmente esta amostra incorporou porções intactas de LE à amostra composta. Amostragens na entrelinha das plantas, todavia, não representariam efeito algum do LE uma vez que este foi aplicado de forma localizada. Isto posto, a amostragem conjunta de linhas e entrelinhas, apesar de causar grande variabilidade, parece até este momento uma das saídas mais racionais para se obter um efeito médio da aplicação dos tratamentos na cana-planta.

Não foi observado efeito da aplicação do LE na condutividade elétrica. Os valores observados foram bastante inferiores aos adotados por Richards apud Porta et al. (2003) para solos com problemas de salinização. Também não foram verificados efeitos dos tratamentos nos valores de CTC (Tabela 15). Neste caso, novamente a calagem igualou as respostas dos diferentes tratamentos (CTCc e CTCe) ao incrementar o pH e conseqüentemente as cargas dependentes da reação do solo. A CTC7 também não foi alterada indicando que a contribuição efetiva da matéria orgânica no desenvolvimento de cargas foi praticamente nulo. Resultados apresentados por Bertoncini (2002), Oliveira et al., (2002) e Andrade (2004) também

evidenciaram a pequena contribuição da matéria orgânica dos lodos na CTC de diferentes solos. A péssima qualidade da matéria orgânica, composta basicamente por substâncias apolares como graxas, óleos (OLIVEIRA, 2000) e compostos fenólicos com $pK_a \geq 10$ (BERTONCINI, 2002) faz com que a geração de cargas elétricas nesses colóides seja mínima nas condições de pH da maioria dos solos tropicais.

Tabela 15 - Efeito dos tratamentos na capacidade de troca catiônica do solo

	CTC _c	CTC _e	CTC ₇
	-----mmol _c kg ⁻¹ -----		
Controle	48	25	55
Ad. Min.	42	18	51
LE + 0P	38	18	46
LE + 45P	46	27	49
LE + 90P	39	14	51
LE + 135P	44	27	51
LE + 180P	37	16	51
CV(%)	24,35	19,73	22,84

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Considerando os teores totais, a aplicação de LE adicionou em ordem decrescente Fe > Zn > Cu > Mn. Verifica-se que houve incrementos nos teores desses elementos com a aplicação de LE e da adubação mineral em comparação ao controle (Tabela 15).

A classificação dos teores disponíveis de Cu e Zn no solo, de acordo com Raij et al. (1997) passaram de baixos para alto. Isto também foi verificado por Galdos et al. (2004) que relataram aumentos de nove vezes nos teores de zinco de um Latossolo Vermelho tratado com 10,1 t ha⁻¹ de lodo de esgoto em comparação à testemunha sem lodo. Ferro e manganês já se encontravam em teores considerados altos.

O aumento dos teores desses elementos, entretanto, não foi proporcional ao adicionado ao solo via lodo (Tabela 16). Isto está de acordo com o verificado por Borges; Coutinho (2004) que estudaram o fracionamento de metais pesados em dois solos (Neossolo e Latossolo) incubados com doses de lodo (0, 10, 20, 40 e 60 t ha⁻¹, base seca) por 120 dias. O estudo mostrou que a maior parte do Cu, Mn e Zn estava associada às frações mais estáveis (óxidos e residual) e de menor disponibilidade em relação ao teor total.

Nascimento et al. (2004) trabalhando com dois solos (Argissolo e Espodossolo) tratados com doses de até 60 t ha⁻¹ (base seca) de LE, em vasos sob condições controladas, verificaram

aumentos nos teores de Cu, Fe, Mn e Zn. Os autores relataram uma baixa recuperação desses metais com DTPA no Argissolo, variando de 3% para o Fe a cerca de 30% para o Cu, Mn e Zn.

Tabela 16 - Teores disponíveis de Cu, Fe, Mn e Zn na camada de 0-0,2 m. Valores médios de quatro repetições

	Cu	Mn	Fe	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----			
Controle	0,19b	7,82	19,16b	0,72b
Ad. Mineral	1,95ab	11,88	48,40a	3,45a
LE + 0 P	1,42ab (4,05)	10,53 (2,85)	42,51ab (97,17)	3,07ab (8,85)
LE + 45 P	1,02ab	11,11	35,92ab	2,97ab
LE + 90 P	1,66ab	9,36	45,24ab	2,91ab
LE + 135 P	1,44ab	9,64	20,72b	3,29ab
LE + 180 P	1,13a	9,70	36,10a	3,06a
CV(%)	67,50	21,59	31,27	38,60

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Valores entre parênteses representam a quantidade do metal adicionada pelo lodo na camada de 0-0,2 m de profundidade, considerando a densidade do solo igual a 1 g cm⁻³

3.2.3.3 Nitrogênio no solo

A aplicação de lodo de esgoto forneceu ao solo aproximadamente 214 kg ha⁻¹ de N-total (Tabela 13) e os resultados para os teores desse nutriente podem ser observados na Tabela 16.

Para a camada de 0-0,2 m foram observados efeitos significativos dos tratamentos nos teores de N-inorgânico, amônio e nitrato e na camada de 0,2-0,4 m apenas para nitrato e relação C/N.

A adubação mineral em comparação ao tratamento LE+0P, resultou nos menores teores das formas inorgânicas de N na profundidade de 0-0,2 m. Concomitantemente a isso foram observados os maiores teores de N-orgânico nos tratamentos com resíduo o que indica que o resíduo constituiu-se numa fonte eficiente de N e que parte desse nutriente continua associado à fração orgânica 16 meses após a sua incorporação no solo. Assim, verifica-se que o cálculo da dose de lodo de esgoto a partir da fração de mineralização do N, determinada em laboratório, tende a subestimar a real liberação do nutriente em condições de campo. Isso também foi verificado por Vieira; Cardoso (2003) trabalhando com um Latossolo tratado com doses de lodo de esgoto.

Aumentos nas formas orgânicas do nitrogênio do solo têm sido verificados em outros estudos (OLIVEIRA et al., 2001; BOEIRA et al., 2002, VIEIRA; CARDOSO, 2003) o que pode representar uma reserva do nutriente a ser disponibilizada para as plantas. A eficiência do LE em fornecer N às plantas, todavia, depende de outros fatores externos ao solo e inerentes à própria planta. Cox (1995) verificou que plantas de crescimento acelerado e alta taxa de absorção de N (*Tagetes erecta* L.) não foram adequadamente supridas nos seus requerimentos em N contrariamente à plantas de crescimento mais lento (*Impatiens* sp. hybrids). Corrêa et al. (2005) verificaram que LE condicionados de diferentes maneiras foram tão eficiente quanto o adubo mineral, na forma de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, no crescimento e fornecimento de N para plantas de azevém.

Tabela 17 - Teores de nitrogênio e relação C/N do solo. Valores médios de quatro repetições

		N-total	N-orgânico	N-inorg.	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	C/N
		-----mg kg ⁻¹ -----					
0,0-0,2 m	Controle	392,92	410,14	34,22abc	6,84bc	27,37abc	15,62
	Ad. Mineral	428,77	445,79	17,01c	3,40c	13,61bc	12,69
	LE + 0 P	433,17	489,86	56,68a	21,54a	35,14a	10,07
	LE + 45 P	429,73	447,48	17,75c	5,68c	12,07bc	11,67
	LE + 90 P	527,58	540,71	13,13c	4,73c	8,40c	12,07
	LE + 135 P	396,55	427,19	13,64c	5,46c	8,19c	13,43
	LE + 180 P	414,54	462,74	48,19a	16,87ab	31,33ab	13,48
CV (%)		22,73	22,85	45,47	49,85	44,46	31,25
		N-total	N-orgânico	N-inorg.	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	C/N
		-----mg kg ⁻¹ -----					
0,2-0,4 m	Controle	349,57	377,99	28,41	5,68	22,73ab	11,13ab
	Ad. Mineral	334,40	379,68	45,28	9,06	36,22a	10,69ab
	LE + 0 P	343,36	366,12	22,75	8,65	14,11b	10,30ab
	LE + 45 P	366,45	393,24	26,79	8,57	18,22ab	9,96ab
	LE + 90 P	303,95	340,70	36,74	13,23	23,52ab	12,34ab
	LE + 135 P	440,81	464,43	23,62	9,45	14,17b	9,05b
	LE + 180 P	331,27	354,26	22,99	8,05	14,94b	13,51a
CV (%)		14,45	15,04	39,98	39,32	40,99	14,16

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Na camada de 0,2-0,4 m foram verificadas diferenças significativas nos teores de nitrato entre os tratamentos AM e LE+0P. A adubação mineral resultou nos maiores valores de N-NO₃⁻ em relação à aplicação do resíduo. Deve-se salientar, neste caso, que os tratamentos, lodo de esgoto e adubos minerais, foram aplicados no fundo do sulco de plantio à cerca de 0,2 m de profundidade e neste sentido, a maior solubilidade dos adubos pode ter favorecido o incremento nos teores de nitrato na camada de 0,2-0,4 m.

As variações dos teores de todas as formas de N são menores que a quantidade de N-total adicionada ao solo indicando que a maior parte do nutriente foi transportada para fora do sistema. Considerando que a cana-planta é mais eficiente que as soqueiras para absorver N (ORLANDO FILHO, 1983) parte desse nutriente pode ter sido incorporado pela cultura. Isso explicaria os menores teores de N inorgânico verificados nos tratamentos com LE e adubo fosfatado uma vez que o P estimula o crescimento, desenvolvimento e atividade das raízes. Isto posto, verifica-se que a aplicação de LE resultou numa maior disponibilização de N no solo e que na dose aplicada não foram evidenciados acúmulos de nitrato na camada de 0,2-0,4 m devido à aplicação do resíduo em comparação à adubação mineral.

3.2.3.4 Fracionamento das formas de P no solo

Inicialmente, um estudo de fracionamento das formas de fósforo foi realizado para se verificar em quais formas o nutriente estaria presente no resíduo (Tabela 18). Na literatura científica há relatos de que as formas inorgânicas de P em lodos norte-americanos constituem cerca de 90% do teor total de P (SOMMERS et al., 1977; SARKAR; O'CONNOR, 2004). Para lodos brasileiros, Andrade (2004) verificou em lodos de diferentes procedências uma variação no conteúdo de P inorgânico da ordem de 40 a 60%.

Verifica-se que do teor total de P no lodo, 0,2% estavam em formas prontamente assimiláveis (P-KCl), 19% em formas inorgânicas associadas ao Fe/Al (P-NaOH) e 11% em formas associadas ao cálcio (P-HCl) totalizando 31% em formas inorgânicas e conseqüentemente 69% em formas orgânicas.

Tabela 18 – Fracionamento das formas de fósforo presentes no lodo de esgoto. Valores médios de quatro repetições

P-KCl	P-NaOH	P-HCl	P-inorgânico	P-orgânico	P-Total
-----mg kg ⁻¹ -----					
12,95	1399,38	843,28	2255,61	5099,39	7355

P-inorgânico = somatório das formas inorgânicas P-KCl, P-NaOH e P-HCl; P-Total = P determinado após digestão de uma amostra de LE com “aqua-régia”. P-orgânico = P-Total – P-inorgânico

Devido os resultados da análise de rotina referentes aos teores disponíveis de fósforo do solo terem-se mostrado pouco conclusivos sobre a disponibilização de P do resíduo, realizou-se um estudo de fracionamento das formas desse nutriente na camada de 0-0,2 m de profundidade e

os dados referentes a este estudo estão na Tabela 19. Neste caso, também não houve efeito significativo dos tratamentos nos teores das diferentes formas de P no solo.

A solução de KCl 1 mol L⁻¹ não se mostrou eficiente e praticamente nenhum P foi extraído com esta solução salina. Os solos tropicais apresentam baixa quantidade de P prontamente solúvel e grande capacidade de fixação do nutriente em óxidos de Fe e Al o que explicaria a baixa eficiência do extrator. Além disso deve-se considerar que a amostragem do solo foi realizada 497 dias após a aplicação do resíduo e do fertilizante, tempo este, suficiente para que o P prontamente lábil passasse para formas menos disponíveis.

Tabela 19 - Fracionamento das formas de P e teores disponíveis extraídos com extrator ácido (P-H₂SO₄) em solo fertilizado com lodo de esgoto e fertilizante fosfatado mineral

	P-KCl	P-NaOH	P-HCl	Pi-total	P-total	P- orgânico	P-H ₂ SO ₄ 0,025 mol L ⁻¹
	-----mg kg ⁻¹ -----						
Controle	...	26,39	3,22	29,61	78,75	49,14	10,35
Ad. Mineral	...	58,62	5,21	63,83	104,00	40,18	16,84
LE + 0 P	...	48,32	4,88	53,21	104,25	51,05	11,49
LE + 45 P	...	50,49	6,17	56,66	110,00	53,34	15,63
LE + 90 P	...	54,76	6,59	61,35	107,25	45,90	15,91
LE + 135 P	...	46,18	9,67	55,86	116,00	60,15	21,40
LE + 180 P	...	48,79	9,67	58,46	118,25	59,79	21,48
CV(%)	...	32,04	57,81	39,97	33,68	33,58	58,32

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Com a aplicação das doses de P-mineral verificou-se uma tendência de aumento nos teores de P moderadamente lábeis (P-NaOH). O LE também forneceu P ao solo tendo em vista o aumento no teor do nutriente no tratamento controle e no tratamento LE + 0P. Munhoz (2001) também verificou aumento das frações mais lábeis (P-CaCl₂ e P-NaHCO₃) e moderadamente lábeis (P-NaOH) com a aplicação de LE em Latossolo Vermelho distrófico. Estes resultados são semelhantes aos verificados por Galdos et al (2004) que evidenciaram que ao mesmo tempo que o LE disponibiliza P este tem sua disponibilidade reduzida pela sua interação com os componentes dos solos tropicais notadamente óxidos de Fe e Al.

Maguire et al. (2000) e Rydin; Ottabong (1997) também verificaram aumentos nos teores de P disponível de solos tratados com LE concomitantemente a aumentos nos teores de P ligado ao Fe e aos óxidos de Al. O resíduo utilizado neste estudo apresentava cerca de 20% do P total

em formas lábeis e moderadamente lábeis – P-KCl + P-NaOH (Tabela 18) o que é indicativo de que ainda persiste uma significativa fração orgânica passível de ser disponibilizada após mineralização. A fração ligada ao Ca (extraída com HCl) apresentou os menores valores e mostra a tendência de ser influenciada também pelo conteúdo de cálcio no superfosfato triplo.

3.2.3.5 Metais pesados no solo

Outro ponto que merece atenção quando da aplicação de LE na agricultura diz respeito ao acúmulo de metais pesados no solo. Neste trabalho as alterações nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb foram avaliadas por meio das variações dos teores totais (Tabela 20).

Tabela 20 - Teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo. Valores médios de quatro repetições

	Cd		Cr		Ni		Pb	
	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m	0-0,2 m	0,2-0,4 m
	-----mg kg ⁻¹ -----							
Controle	0,50	0,59	3,78	8,81	2,11	2,20	4,95	11,89
Adubação Mineral	0,51	0,53	4,73	6,00	2,08	2,15	6,42	9,69
LE + 0 P	0,59	0,62	5,90	5,33	1,92	2,64	4,95	11,43
LE + 45 P	0,52	0,62	3,45	6,58	1,82	2,63	8,27	11,27
LE + 90 P	0,51	0,60	4,30	6,96	1,25	2,55	4,14	10,88
LE + 135 P	0,52	0,61	5,30	8,48	1,93	3,02	8,11	13,88
LE + 180 P	0,50	0,63	4,68	6,55	1,55	3,45	4,57	13,55
CV (%)	28,20	23,54	39,06	32,56	45,27	26,05	49,78	28,52

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Não houve efeitos significativos dos tratamentos nos teores dos metais pesados avaliados indicando que a aplicação de LE na dose de 8 t ha⁻¹ não implicou em efeitos deletérios na qualidade do solo tendo como parâmetro o acúmulo de metais pesados uma vez que estatisticamente a variabilidade observada é devida à outros fatores que não os tratamentos.

Estes resultados estão de acordo com o verificado por outros trabalhos que também não observaram alterações acentuadas nos teores de metais pesados com a aplicação de LE em doses, inclusive, muito superiores à adicionada neste estudo (MARQUES, 1996; SILVA et al., 1998; OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; BERTONCINI, 2002).

Considerando os dados da Tabela 13, a densidade do solo igual a 1 g cm⁻³ e a camada de 0-20 cm de profundidade, a dose de LE aplicada resultou num aporte de 0,04 mg kg⁻¹ de Cd, 0,8 mg kg⁻¹ de Cr, 0,18 mg kg⁻¹ de Ni e 0,78 mg kg⁻¹ de Pb. Tendo em vista que a extração desses metais com DTPA, que forneceria a quantidade disponível no solo, resultou em valores abaixo

do limite de detecção do método analítico admite-se que, nas condições experimentais, adição do LE no plantio da cana-de-açúcar não causou efeitos deletérios na qualidade do solo.

3.2.3.6 Macronutrientes na cana-de-açúcar

Os teores de macronutrientes na cana-de-açúcar, folhas e caldo podem ser observados nas Tabelas 21 e 22. De acordo com Raij et al. (1997) a faixa de teores de macronutrientes considerada adequada para a cana-de-açúcar é igual a: 18-25, 1,5-3,0, 10-16, 2,0-8,0, 1,0-3,0, 1,5-3,0 g kg⁻¹, respectivamente para N, P, K, Ca, Mg e S. Verifica-se que todos os nutrientes estavam presentes no tecido foliar em quantidades adequadas, dentro da faixa de teores supracitada, tanto aos 10 como aos 16,5 meses (Tabela 21). Houve efeitos significativos dos tratamentos, aos 10 meses, para os teores foliares de N, K, Ca e Mg e aos 16,5 meses para K, Ca, Mg e S (Tabela 21). No caldo, verificaram-se efeitos significativos nos teores de N, P e K (Tabela 22).

Com relação aos teores foliares, entretanto, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos AM e LE + 0P, para os nutrientes em questão, o que indica que as plantas nesses tratamentos tiveram suas exigências nutricionais adequadamente supridas. Em nenhum momento verificou-se que a aplicação adicional de P, via superfosfato triplo (SFT), resultou em uma melhor nutrição das plantas em comparação ao resíduo aplicado sem P.

Este resultado vai de encontro ao verificado por outros autores que relataram aumentos na absorção de P por plantas fertilizadas com doses de LE e que conseqüentemente adicionava quantidades crescentes de P, via resíduo (BERTON et al., 1989; OLIVEIRA et al., 1995; SILVA et al., 1998; SIMONETE et al., 2003; GALDOS et al., 2004). São concordantes, porém, com os resultados obtidos por Anjos (1999) e por Corrêa (2004) que não verificaram uma relação direta de causa e efeito entre os aumentos dos teores de P no solo (via lodo ou fertilizante) e os teores do nutriente na planta.

No caldo houve aumento nos teores de P com as doses de SFT, porém todos os tratamentos, inclusive o controle, apresentaram teores adequados para a fermentação alcoólica que segundo Amorim (1985) é igual a 131 mg L⁻¹ de P. Verificou-se uma tendência de decréscimo nos teores de K, Ca e Mg nas folhas e no caldo da cana-de-açúcar com a aplicação do LE em comparação ao tratamento AM (Tabelas 21 e 22). Observando-se os dados apresentados na Tabela 14 verifica-se também a tendência de redução dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺

com o aumento da aplicação de P-mineral, o que corrobora com a redução dos teores foliares desses elementos.

Tabela 21 - Teores foliares de macronutrientes em duas épocas de amostragem. Valores médios de quatro repetições

	<i>10 meses após plantio</i>					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ -----					
Controle	27,94c	2,08	11,64c	6,44a	4,34a	2,01
AM	39,11ab	2,54	19,23ab	6,30ab	3,69ab	2,38
LE + 0 P	43,36a	2,25	21,40ab	5,70abc	3,22bc	2,30
LE + 45 P	35,04bc	2,44	22,69a	5,39abc	3,13bc	2,05
LE + 90 P	34,91bc	2,62	20,62ab	5,77abc	3,42bc	2,24
LE + 135 P	36,62ab	2,27	22,04ab	4,44c	2,92bc	2,13
LE + 180 P	36,84ab	2,78	17,31b	4,61bc	2,71c	1,75
CV(%)	8,49	16,26	10,99	13,63	9,87	12,87
	<i>16,5 meses após o plantio</i>					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g kg ⁻¹ -----					
Controle	26,12	1,73	14,28b	8,08ab	4,87a	1,70a
AM	26,53	2,20	20,39ab	6,72ab	3,92a	2,02a
LE + 0 P	27,38	2,21	19,25ab	7,33ab	4,14a	1,96a
LE + 45 P	26,64	2,24	22,54a	6,60ab	3,85a	2,18a
LE + 90 P	24,89	2,25	19,86ab	8,55a	4,69a	1,83a
LE + 135 P	26,67	1,95	21,45a	5,41bc	3,29ab	1,61a
LE + 180 P	26,12	2,20	4,14c	3,57c	2,12b	0,58b
CV(%)	8,42	23,79	15,67	18,93	18,19	25,23

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Tabela 22 - Teores de macronutrientes no caldo de cana-de-açúcar. Valores médios de quatro repetições

	N	P	K	Ca	Mg	S
		-----mg L ⁻¹ -----				
Controle	10,99a	212ab	795ab	192	337	239
AM	10,43ab	145b	875ab	184	299	278
LE + 0 P	6,15b	167ab	938ab	153	239	270
LE + 45 P	6,34b	185ab	1368a	150	250	323
LE + 90 P	13,32a	222ab	1103ab	171	270	277
LE + 135 P	5,68b	171ab	1053ab	133	225	269
LE + 180 P	5,40b	269a	705b	131	224	233
CV(%)	26,19	25,77	26,72	23,74	23,39	24,12

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Uma possível explicação para este fato está ligada à dinâmica de lixiviação de íons. Na maioria dos solos há predomínio de cargas negativas nas superfícies de troca iônica. Para manter a eletroneutralidade da interface sólido:líquido se necessária a presença de co-íons e contraíons equilibrando as cargas positivas e negativas tanto na superfície dos colóides como na solução do solo (RAIJ, 1986). A adição de íons e nesse caso em particular dos ânions fosfato - via SFT, sulfato - via LE e cloreto - via KCl, pode ter causado um desbalanço de cargas com predomínio de ânions em solução. O movimento da água da chuva percolando através do perfil do solo pode ter carregado os íons em solução mas como a quantidade de ânions lixiviada deve ser igual a de cátions para preservar a eletroneutralidade do sistema, o aumento dos teores de fosfato, sulfato e cloreto pode ter resultado numa maior perda de cátions trocáveis, notadamente K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} que são os íons dominantes no complexo coloidal do solo.

Isto também foi verificado por Anjos (1999) que relatou aumento na lixiviação desses íons com a adição de LE. Em ordem decrescente a lixiviação dos íons foi $K > Mg > Ca$ e considerando que o LE é relativamente pobre nesses elementos fica a preocupação quanto às perdas desses elementos ocasionadas pela adição do resíduo e seus efeitos na nutrição das plantas. Isto gera certa preocupação por que o LE é sabidamente pobre em K e Mg e adições sucessivas do resíduo em solos agrícolas podem exigir a reposição desses nutrientes. A adição de K quando da aplicação do LE já é quase uma rotina mas isso não ocorre para o Mg que, via de regra, é aplicado somente via calagem.

3.2.3.7 Micronutrientes e metais pesados na cana-de-açúcar

Os teores foliares de metais pesados nas folhas e no caldo da cana-de-açúcar podem ser observados nas Tabelas 23 e 24, respectivamente. Tanto nas folhas como no caldo Cd, Cr, Ni e Pb estiveram presentes em quantidades abaixo do limite de determinação do método analítico. Assim os teores desses elementos estiveram abaixo de $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ fato este que não indica que os mesmos não estavam presentes nas amostras.

Conforme Raij et al., (1997) a faixa de teores de Cu, Fe, Mn e Zn considerada adequada para as folhas da cana-de-açúcar é igual a: 6-15, 40-250, 25-250 e 10-50 mg kg^{-1} , respectivamente. Os teores foliares desses elementos estiveram em quantidades de acordo com a faixa de valores acima citada em todos os tratamentos.

Tabela 23 - Teores foliares de Cu, Fe, Mn, Zn. Valores médios de quatro repetições

<i>10 meses de idade</i>				
	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----			
Controle	16,18a	259,52a	51,87b	29,88c
Adubação Mineral	12,42ab	215,66ab	105,02a	43,04ab
LE + 0 P	11,08ab	117,38bc	110,86a	43,56ab
LE + 45 P	13,18ab	181,04abc	103,41ab	41,39abc
LE + 90 P	11,39ab	116,64bc	111,82a	45,34abc
LE + 135 P	10,29b	90,88c	106,36a	39,56ab
LE + 180 P	9,76b	102,61bc	90,97ab	33,02abc
CV (%)	18,83	32,89	23,15	12,52
<i>16,5 meses de idade</i>				
Controle	13,63	83,27	66,47b	24,48bc
Adubação Mineral	14,59	130,02	124,99ab	39,59ab
LE + 0 P	12,14	83,07	144,22ab	35,23ab
LE + 45 P	14,33	95,74	167,81a	42,68a
LE + 90 P	12,89	95,22	143,96ab	42,63a
LE + 135 P	13,88	75,03	140,47ab	33,80abc
LE + 180 P	12,33	41,03	76,87ab	19,19c
CV (%)	20,93	43,18	34,18	20,20

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Tabela 24 - Teores de Cu, Fe, Mn e Zn no caldo de cana-de-açúcar. Valores médios de quatro repetições

	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----mg L ⁻¹ -----			
Controle	0,39	5,21	7,27	2,58
Ad. Mineral	0,55	5,76	9,07	3,54
LE + 0 P	0,29	7,33	9,67	3,92
LE + 45 P	0,28	5,58	10,16	4,41
LE + 90 P	0,32	8,84	9,39	4,02
LE + 135 P	0,27	4,37	9,76	3,31
LE + 180 P	0,26	3,74	7,96	3,73
CV (%)	57,44	74,53	35,62	40,20

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Houve efeitos significativos dos tratamentos nos teores de Cu, Fe, Mn e Zn aos 10 meses de idade e para Mn, Zn aos 16,5 meses. Em nenhuma dessas amostragens, todavia, foram verificadas diferenças nos teores foliares desses elementos entre os tratamentos AM e LE+0P. Esse resultado era esperado quando se observam os teores disponíveis desses elementos que estavam em quantidades suficientes para o desenvolvimento das plantas (Tabela 13). Os

elevados teores de Fe e Cu foliar, nas duas épocas de amostragem, no tratamento controle possivelmente se devem à menor produção de fitomassa o que conseqüentemente concentrou esses metais tendo em vista que eles foram absorvidos em quantidades similares nos demais tratamentos. Neste caso o solo era naturalmente rico nesses micronutrientes e a aplicação do LE não causou modificações nos seus teores tanto no solo quanto na planta. Martins et al. (2003) trabalhando com milho cultivado num Latossolo tratado com doses de LE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹) verificou aumentos nos teores foliares de Zn com as doses do resíduo. Mesmo nas maiores doses não foram verificados aumentos nos teores de Cu e os autores relataram também redução nos teores de Fe e Mn com a aplicação do LE.

No presente estudo verificou-se redução nos teores foliares de Cu, Fe, Mn e Zn com as doses de P-mineral. A aplicação do LE isoladamente, LE+0P, não diferiu estatisticamente do tratamento AM indicando que o aporte desses metais, via LE, não resultou em aumentos na absorção desses metais pela planta. Neste sentido o resíduo utilizado se caracterizava por ser um material bastante estabilizado o que pode ter contribuído para uma maior retenção dos metais na matriz orgânica de modo muito pouco fitodisponível.

3.2.3.8 Rendimentos da cana-de-açúcar

Na Tabela 25 são apresentados os dados referentes à produção de colmos e dos rendimentos industriais. Houve efeitos significativos dos tratamentos na produção de colmos em toneladas de cana/hectare (TCH), porcentagem de fibra e açúcar teoricamente produzido em um hectare (TAH). A produção de colmos nos tratamentos com LE foi similar à do tratamento AM nas maiores doses de P adicionado, que correspondiam a complementação de 75 e 100% da dose de P mineral, respectivamente.

Esses resultados não estão em concordância com o verificado por Marques (1996) que não observou alteração alguma nos rendimentos de uma variedade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com doses de LE até 32 t ha⁻¹. Bertoncini (2002) aplicando o equivalente a 388 t ha⁻¹ em Latossolo Vermelho, em vasos, verificou efeitos depreciativos na qualidade da cana-de-açúcar com aumentos no teor de açúcares redutores e redução do conteúdo de fibras. O autor, porém, também verificou aumento no perfilhamento das plantas com a adição do resíduo.

Rossetto et al. (2002) trabalhando com as variedades RB855113 e IAC873396 testaram diferentes fontes minerais de P e também não verificaram diferenças significativas na produção de colmos com a aplicação de P (120 e 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente em cada variedade)

e a testemunha sem P. Diferenças significativas na TCH foram verificadas apenas nos cultivos subseqüentes.

Tabela 25 - Efeitos da aplicação de lodo de esgoto com e sem suplementação de fósforo sobre a produção de colmos e parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar

	TCH	Brix	Fibra	Pol cana	ATR cana	PZA cana	AR cana	TAH
	t ha ⁻¹		-----%-----		kg t ⁻¹	%		t ha ⁻¹
Controle	93,75d	20,58	12,27a	16	153	93,55	0,36	14,34e
AM	216,61a	19,95	11,38ab	16	150	92,57	0,40	34,02a
LE + 0 P	161,07c	20,45	11,71ab	16	153	92,81	0,39	24,66cd
LE + 45 P	156,43c	19,93	11,29ab	16	150	92,54	0,40	23,46de
LE + 90 P	155,00c	20,20	11,73ab	16	151	92,86	0,39	23,45de
LE + 135 P	191,43ab	20,20	11,13b	16	152	92,17	0,41	29,07b
LE + 180 P	191,79ab	20,05	11,57ab	16	149	91,86	0,42	28,62bc
CV (%)	15,62	2,25	3,76	2,98	2,69	1,45	10,43	16,35

TCH = t ha⁻¹ de colmos de cana; ATR = açúcar total recuperável; AR = açúcares redutores; TAH = t ha⁻¹ de açúcar. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey a 5%). Médias não seguidas de letras indicam que o teste F para os tratamentos não foi significativo.

Os resultados obtidos para Pol não foram afetados estatisticamente com as doses de fósforo mineral adicional aplicado contrariando o verificado por Rodella; Orlando Filho (1984) que relataram, para cana-planta (NA56-79), aumento nesta variável com a aplicação de até 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Rossetto et al. (2002) não verificaram diferenças significativas na Pol, ATR e Pureza no caldo de cana-de-açúcar fertilizada com P e a testemunha que não recebeu P.

Isto também foi verificado por Morelli et al. (1987) que relataram não haver diferença significativa na TCH entre a testemunha, sem P, e até 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato simples aplicado no sulco de plantio. A aplicação do P no sulco de plantio ao mesmo tempo em que reduz a fixação de P nos colóides do solo, ao que parece, reduz também a área de contato das raízes que poderiam absorver o nutriente.

Houve efeitos significativos das doses de P-mineral adicionadas conjuntamente ao lodo na TCH e na TAH (Figura 20). O efeito das doses de P na TAH, significância e formato da curva de resposta, está bastante correlacionado com a resposta da TCH ao nutriente tendo em vista que não houve efeito significativo na ATR e o cálculo da TAH envolve esses dois parâmetros. Por fim, verifica-se que a substituição do P-mineral pelo lodo de esgoto não depreciou a qualidade da cana-de-açúcar produzida embora o tratamento AM tenha resultado na maior produção de colmos.

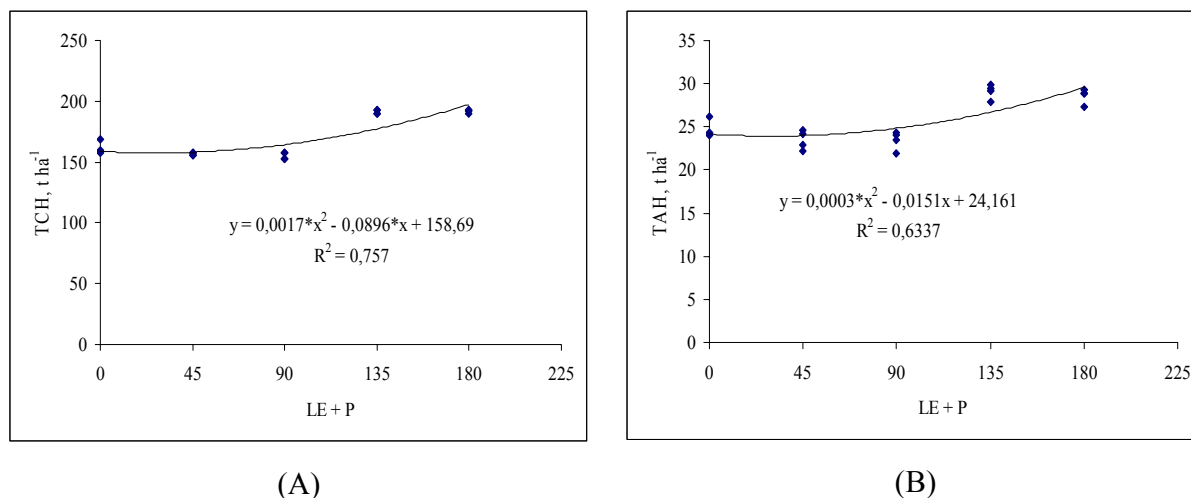


Figura 21 – Análise de regressão para produção de colmos e de açúcar em função das doses de P aplicadas em associação ao LE. * = significativo a 5% pelo teste F

3.2.4 Conclusões

A aplicação de LE na dose de 8 t ha⁻¹ (base seca) não resultou em produção de colmos similar à obtida no tratamento com adubação mineral. Foi necessário aplicar adicionalmente ao resíduo 135 kg ha⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato triplo para a obtenção de TCH em níveis próximos ao do tratamento AM.

A adição de LE resultou em aumento na disponibilidade de P no solo mas a quantidade do nutriente absorvida pelas plantas não foi afetada.

Com a dose de LE utilizada não foram observados efeitos deletérios na qualidade do solo, em termos de acúmulos de metais pesados e alterações na condutividade elétrica, e da matéria prima, em termos dos rendimentos industriais do caldo da cana-de-açúcar.

Referências

ABREU, M.F. **Extração e determinação de simultânea por emissão em plasma de nutrientes e elementos tóxicos em amostras de interesse agrônomo.** 1997. 135p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de Campinas, Campinas. 1997.

ABREU, C.A.; ANDRADE, J.C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.p.240-250.

ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**: a comprehensive study of Saccharum source-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752p.

ALFONSI, R.R.; PEDRO JUNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: In: PARANHOS, S.B. (coord.) **Cana-de-açúcar – Cultivo e Utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v.1. p.42-55.

AMORIM, H.V. Nutrição mineral de leveduras: aspectos teóricos e práticos. In: SEMANA DE FERMENTAÇÃO “JAIME ROCHA DE ALMEIDA”, 4. 1985, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: STAB, 1985. 149p.

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

ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n. , p.927-938, 2000.

BAIRD, C. **Química ambiental**. Porto Alegre: Bookman. 2002. 622p.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).

BEAUCLAIR, E.G.F. **Produtividade da cana-de-açúcar em função de alguns macronutrientes presentes no caldo e no solo**. 1994. 97p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.187-192, 1989.

BERTONCINI E.I.; MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.737-744, 1999.

BERTONCINI, E.I. **Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido: Extração sequencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas**. 2002, 195p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BETTIOL, W. ; CARVALHO, P.C.T. Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizante organo-mineral IPT na cultura de milho. **Fertilizantes**, São Paulo, v.4, n.1, p.14-15, 1982.

- BITTENCOURT, V.C. Fósforo na adubação da cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.14, n.1, p.6, 1995.
- 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 lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.11, p.1639-1647, 2002.
- BORGES, M.R.; COUTINHO, E.L.M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. I – Fracionamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.548-555, 2004.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).
- CATANI, R.A.; JACINTHO, A.O. **Avaliação da fertilidade do solo: métodos de análise**. Piracicaba: Livrocere, 1974. 61p.
- CESAR, M.A.A.; SILVA, F.C. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira**. Piracicaba: ESALQ, 1993. 108p.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, p.133-144, 1957.
- CIIAGRO. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/Ciiagro>>. Acesso em: 01 dez. 2004.
- CLEMENTS, H.F.; MARRTIN, S.P.; MORIGUCHI, S. Compostion of sugarcane plants grown in deficiency nutrient solution. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, n.45, p.227-239, 1941.
- CLEMENTS, H.F. **Sugarcane crop logging and crop control: principle and practice**. Hawaii: The University of Hawaii Press. 1980, 520p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de biossólido em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação (Manual Técnico)**. São Paulo, 1999. 35p.
- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – **Manual de instruções**. Piracicaba: Consecana, 1999. 92p.
- CORRÊA, R.S. Efficiency of five biosolids to suply nitrogen and phosphorus to ryegrass. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1133-1139, 2004.
- CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, A.J. Biosolids effectiveness to yield ryegrass base don their nitrogen content. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.274-280, 2005.

COX, D.A. Pelletized sewage sludge as fertilizer for containered plants: plant growth and nitrogen leaching losses. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v.18, n.12, p-2783-2795, 1995.

CUNNINGHAM, I.D.; KEENEY, D.R.; RYAN, J.A. Yield and metal composition of crop and rye grown on sewage sludge amended soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.4, p.448-454, 1975.

DA ROS, C.O.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. 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, 1993.

DILLEWJUN, C. van. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botânica, 1952, 371p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Test methods for evaluating solid waste**. Physical/Chemical methods. 3 ed. Washington, D.C. Environmental Protection Agency, Office of solid waste and Emergency response, U.S. Government Printing Office. snp. SW-846. 1986.

EPSTEIN, E. **Land application of sewage sludge and biosolids**. Boca Raton: CRC Press LLC. 201p. 2003.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas**: principios e perspectives. São Paulo: EDUSP; Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975.341p.

EPSTEIN, E. TAYLOR, J.M.; CHANEY, R.L. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.5, p.422-426, 1976.

ESPIRONELLO, A. Contribuição do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para a Nutrição e Adubação da Cana-de-Açúcar. II. Fósforo em cana-planta. **STAB**, Piracicaba, v.8, n.2, p.14-21, 1989.

FROSSARD, E.; SINAJ, S.; DUFOUR, P. Phosphorus in urban sewage sludge as assessed by isotopic exchange. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.60, n.1, p179-182, 1996.

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, n.3, p.569-577, 2004.

GILLMAN, G.P.; SUMPTER, E.A. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.24, p.61-66, 1986.

GLÓRIA, N.A.; CATANI, R.A.; MATUO, T. A determinação da capacidade de troca de cátions do solo pelo método do EDTA. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v.40, p.195-198, 1965.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison. v.46, p.970-976, 1982.

HUE, N.V. Sewage sludge. In: RECHCIGL, J.E.(Ed.) **Soil Amendments and environmental quality**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.199-247.

HUGOT, E. **Manual de engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou. 1977, v.1. 544p.

HUMBERT, R.P. **The growing of sugarcane**. Amsterdam; New York; Essex: Elsevier. 1968, 770p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acessado em: 21 nov. 2004.

KELLING, K.A.; PETERSON, A.E.; WALSH, L.M.; RYAN, J.A.; KEENEY, D.R. A field study of the agricultural use of sewage sludge. I. Effect on crop yield and uptake of N and P. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, p.339-345, 1977a.

KELLING, K.A.; WALSH, L.M.; KEENEY, D.R.; RYAN, J.A.; PETERSON, A.E. A field study of the agricultural use of sewage sludge. II – Effect on soil N and P. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, p.345-352, 1977b.

KONDORFER, G., MARTINS, M. Importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v.10, n.3, p.26-31, 1992.

KORBOULEWSKY, N.; DUPOUYET, S.; BONIN, G. Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals and phosphorus accumulation, **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.31, p.1522-1527, 2002.

LOPES, A.S. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. Piracicaba: Potafos. p.51-66, 1998.

MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (coord.) **Cana-de-açúcar – Cultivo e Utilização**. Campinas, Fundação Cargill, v.1, 1987. p.56-87.

MAGUIRE, R.O.; SIMS, J.T.; COALE, F.J. Phosphorus solubility in biosolids amended soils in the Mid-Atlantic region of the USA. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, p.1225-1233, 2000.

MARQUES, M.O. **Efeitos da aplicação de lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. 1990. 168p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1990.

- MARQUES, M.O. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar**. Jaboticabal, 1996. 111p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”. Jaboticabal, 1996.
- MARTINS, A.L.C.; BATAGLIA, O.C.; CAMARGO, O.A.; CANTERELLA, H. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.563-574, 2003.
- MATTIAZZO, M.E. **Amostragem de solo para fins de avaliação da fertilidade na área de reforma de canaviais**. 1982. 114p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.
- MELLO, W.J.; MARQUES, M.O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W. E CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto Ambiental e uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.109-141.
- MENGEL, K.; KIRBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1987. 687p.
- MORELLI, J.L.; DEMATTE, J.L.I.; SILVA, J.A.V.; BAPTISTELLA, J.R.; GIOVANETTI, L.Z. Efeitos da aplicação do superfosfato simples em área total e dentro do sulco. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 4, 1987, Olinda. **Anais...** Olinda: STAB, 1987. p.76-83.
- MUNHOZ, R.O. **Disponibilidade de fósforo para milho em solo que recebeu lodo de esgoto**. 2001, 74p. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2001.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. A Modified single method for the determination of phosphate in natural waters. **Analitica Chimica Acta**. Amsterdam, v.27, p.31-36, 1962.
- MULVANEY, R.L. Methods for determination of inorganic nitrogen in soil. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis: chemical methods**. Madison: SSSA; ASA, 1996.p1125-1139.
- NASCIMENTO, C.W.; BARROS. D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. Alterações química em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.2, p.385-392, 2004.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, J.T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV. 1999. 399p.
- O’CONNOR, G.A.; SARKAR, D.; BRINTON, S.R.; ELLIOTT, H.A.; MARTIN, F.G. Phytoavailability of biosolids phosphorus. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.33, p.703-712, 2004.

OLIVEIRA, F.C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, F.C.; MARQUES, M.O.; BELLINGIERI, P.A.; PERECIN, D. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, 360-367, 1995.

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

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

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana de açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 368p. (Coleção Planalsucar, 2).

PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. **Edafologia para la agricultura y el medio ambiente**. Madrid: Mundi-Prensa. 2003, 960p.

ProCana. Disponível em: <<http://www.procana.com.br>>. Acessado em: 01 dez. 2004.

RAIJ, B. van. Propriedades eletroquímicas de solos. In: DECHEN, A.R.; CARMELLO, Q.A. (Coord.) Simpósio avançado de química e fertilidade do solo. 1, 1986. Piracicaba. **Anais...**Piracicaba: Fundação Cargill, 1986. p.9-42.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo; Piracicaba: Ceres, Potafos. 1991. p.181-204.

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; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) Cana-de-açúcar. In: **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo – Fundação IAC, 1997. p.237-239. (Boletim Técnico, 100).

RYDIN, E.; OTTABONG, E. Potential release of phosphorus from soil mixed with sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison. v. 26, n.3, p.529-534, 1997.

RODELLA, A.A.; ORLANDO FILHO, J. Influência da aplicação de nitrogênio, fósforo e potássio sobre o teor de sacarose da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 3, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Bandeirante, 1984. p.163-168.

ROSSETTO, R.; FARHAT, M.; FURLAN, R.; GIL, M.A.; SILVA, S.F. Eficiência agronômica do fosfato natural na cana-de-açúcar. In: : CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 8, 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p.276-282.

SARKAR, D.; O'CONNOR, G.A. Plant and soil responses to biosolids-phosphorus in two Florida soils with high phosphorus content. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.35, p.1569-1589, 2004.

SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Ed.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American society of agronomy., 1980. p. 471-514.

SAS Institute Inc. **Statistical analysis system**. SAS/STAT User's guide, version 6. 4ed. Cary, 1989. v.1/2. 1686p.

SASTRE, J.; SAHUQUILLO, A.; VIDAL, M.; RAURET, G. Determination of Cd, Cu, Pb e Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, n.462. p.59-62, 1999.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.

SILVA, F.C. **Uso agronômico de lodo de esgoto: Efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar**. 1995. 170p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.13, n.1, p.1-8, 1998.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEXE, C.A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.13, n.1, p.1-8, 1998.

SILVA, G.M. Influência da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.) **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. IAA: PLANALSUCAR, Piracicaba. 1983. p.317-332.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I-Efeito na produção de milho e adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.487-495, 2002.

SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A.; TEIXEIRA, C.F.A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.10, p.1187-1195, 2003.

SOMMERS, L.E.; NELSON, D.W.; YOST, K.J. Variable nature of the chemical composition of sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.5, n.3, p.303-306, 1976.

SOMMERS, L.E.; SUTTON, A.L. Use of waste materials as source of phosphorus. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Ed.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American society of agronomy. 1980. p. 515-544.

STEVENSON, F.J. The phosphorus cycle. In: _____ **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients**. New York: Wiley. 1986. p.231-284.

STURION, A.C. ; FERNANDES, A.C. Análise direta de cana-de-açúcar pelo método para prensa hidráulica. **Boletim Técnico COPERSUCAR**. Piracicaba, v. 8, p. 12-15, 1979.

SUI, Y.; THOMPSON, M.L.; SHANG, C. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids. **Soil Science Society American Journal**, Madison. v.63, p.1174-1180, 1999.

SUI, Y.; THOMPSON, M.L. Phosphorus sorption, desorption and buffering capacity in a biosolids amended Mollisol. **Soil Science Society American Journal**, Madison. v.64, p.164-169, 2000.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

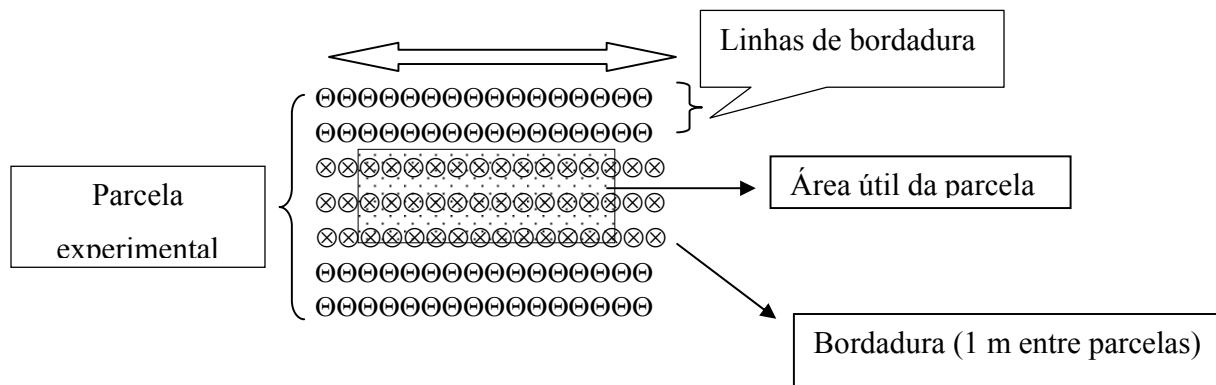
VIEIRA, R.F.; CARDOSO, A.A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.867-874, 2003

WHITE, J. **Toxic action of common elements towards yeast growth**. Yeast Technology. London: Chapman and Hall, 1954. 286p.

WILLIAMS, J.P.H. ; COCKER, E.G. Phosphorus in sewage sludge and its behavior in soil. In: HUCKER, T.W.G. ; GATROUX, G. (Ed.) **Phosphorus in sewage sludge and animal waste slurries**. London: D. Reidel Publishing Company. 1980. p.291-307.

APÊNDICES

APENDICE A – Croqui de uma parcela experimental



APENDICE B – Programação utilizada no forno de microondas CEM para método de digestão de folhas de plantas por via úmida em microondas

Etapa	1	2
Potência (W)	296	565
Pressão (kPa)	415	553
Tempo (min.)	10:00	15:00

APENDICE C – Comprimentos de onda utilizados no ICP-AES para os elementos determinados nos extratos de plantas e solos

Elemento	Comprimento de onda (nm)
P	178,225
Ca	317,933
Mg	279,940
Mn	257,610
Fe	259,940
Cu	324,754
Zn	213,856
Pb	220,353
Cd	226,502
Ni	231,604
Cr	267,716
Al	308,215
S	180,672
B	208,959
K	766,490

ANEXOS

ANEXO A – Atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 0-0,2 m. Valores médios de quatro observações

Tratamento	pH		C		P _{resina}		Ca		K		Mg		H+Al		CE	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
			g kg ⁻¹		mg dm ⁻³		-----mmol _c dm ⁻³ -----								dS m ⁻¹	
T1-Controle	4,8	4,8	11,60	13,66	58	27	25	27	0,8	0,5	11	10	41,5	43,5	0,16	0,12
T2-AM	4,8	4,6	12,76	13,37	47	33	26	23	1,2	0,8	12	8	43,2	51,0	0,18	0,11
T3-LE + 0N _{ISA}	4,8	4,7	11,17	14,68	59	36	27	26	0,8	0,5	12	8	41,2	44,7	0,28	0,19
T4-LE + 0N _{IS60A}	4,9	4,7	12,62	14,83	50	33	26	30	0,9	0,6	13	9	39,2	44,5	0,27	0,27
T5-LE + 60N _{ISA}	4,8	4,5	11,89	15,70	55	49	30	26	0,8	0,8	10	9	43,5	47,7	0,39	0,28
T6-LE + 60N _{IS60A}	4,8	4,5	12,04	16,42	52	48	24	29	1,2	0,8	11	9	41,5	44,7	0,28	0,24
T7-LE + 120N _{ISA}	4,9	4,4	12,18	14,24	58	36	25	25	1,0	0,6	11	7	42,5	55,2	0,25	0,26
T8-LE+120N _{IS60A}	4,7	4,6	13,20	14,68	68	30	24	30	1,1	0,7	10	10	45,7	44,5	0,35	0,19
ANOVA - Teste F																
Tratamentos	0,42 NS	3,63 *	2,71 *	3,11 *	1,05 NS	2,42 NS	0,70 NS	2,80 *	0,69 NS	2,11 NS	1,05 NS	2,00 NS	0,67 NS	1,55 NS	1,75 NS	4,44 **
Trat. Ad. vs. Fat.	0,07 NS	5,02 *	0,02 NS	12,01 **	0,81 NS	4,17 NS	0,25 NS	6,08 NS	0,09 NS	0,42 NS	0,17 NS	0,25 NS	0,02 NS	0,02 NS	7,71 *	23,11 **
Controle vs. AM.	0,06 NS	4,01 NS	4,20 NS	0,07 NS	1,48 NS	0,58 NS	0,17 NS	2,75 NS	1,84 NS	4,26 *	0,17 NS	2,23 NS	0,28 NS	2,55 NS	0,06 NS	0,11 NS
Dose de N (N)	0,36 NS	5,03 *	2,45 NS	4,05 *	1,41 NS	5,71 NS	0,64 NS	0,07 NS	0,60 NS	4,26 *	2,21 NS	0,27 NS	1,36 NS	1,31 NS	0,52 NS	0,75 NS
Incorporação (I)	0,01 NS	1,69 NS	7,10 *	1,22 NS	0,01 NS	0,60 NS	1,80 NS	10,50 **	1,23 NS	0,95 NS	0,01 NS	5,96 *	0,02 NS	2,96 NS	0,02 NS	0,24 NS
N x I	1,07 NS	2,32 NS	1,40 NS	0,17 NS	1,10 NS	0,10 NS	0,70 NS	0,07 NS	0,24 NS	0,32 NS	1,28 NS	2,50 NS	0,83 NS	1,34 NS	1,72 NS	3,06 NS
C.V.(%)	3,91	3,07	6,54	8,78	22,40	28,16	16,53	10,28	46,74	28,98	15,60	16,66	11,14	14,13	44,24	30,23

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO B – Atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 0,2-0,4 m. Valores médios de quatro observações

Tratamento	pH		C		P		Ca		K		Mg		H+Al		CE			
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04		
			g kg ⁻¹		mg dm ⁻³		-----mmol _c dm ⁻³ -----										dS m ⁻¹	
T1-Controle	4,6	4,5	9,86	10,90	40	16	18	19	0,4	0,3	9	8	45,0	52,2	0,16	0,15		
T2-AM	4,7	4,4	10,73	11,19	43	13	23	17	0,7	0,6	11	6	43,7	54,0	0,16	0,14		
T3-LE + 0N _{ISA}	4,6	4,5	9,72	10,47	53	16	20	20	0,5	0,9	10	7	45,7	47,0	0,22	0,16		
T4-LE + 0N _{IS60A}	4,7	4,6	9,72	12,35	45	19	19	23	0,4	0,9	10	9	42,2	43,2	0,18	0,24		
T5-LE + 60N _{ISA}	4,6	4,3	9,57	11,92	43	27	21	20	0,5	0,5	10	8	47,0	49,5	0,29	0,23		
T6-LE + 60N _{IS60A}	4,6	4,4	10,15	12,94	42	27	20	23	0,5	0,9	10	8	43,2	47,0	0,21	0,23		
T7-LE + 120N _{ISA}	4,6	4,4	10,01	11,92	52	24	20	23	0,5	0,4	10	9	50,0	49,5	0,25	0,26		
T8-LE + 120N _{IS60A}	4,7	4,5	10,44	11,19	47	16	22	23	0,5	0,5	10	8	45,5	47,0	0,26	0,19		
ANOVA – Teste F																		
Tratamentos	0,40 NS	2,15 NS	0,77 NS	1,99 NS	0,96 NS	1,66 NS	0,59 NS	3,32 *	1,91 NS	2,62 *	0,24 NS	2,24 NS	0,31 NS	1,62 NS	3,83 **	4,75 **		
Trat. Ad. vs. Fat.	0,07 NS	0,01 NS	0,95 NS	3,71 NS	0,02 NS	3,78 NS	0,02 NS	14,69 **	1,06 NS	3,03 NS	0,06 NS	6,45 *	0,01 NS	7,43 *	13,60 **	17,89 **		
Controle vs. AM.	1,58 NS	0,48 NS	1,83 NS	0,34 NS	1,48 NS	0,30 NS	2,62 NS	0,52 NS	9,90 **	2,28 NS	1,02 NS	3,70	0,04 NS	0,22 NS	0,02 NS	0,03 NS		
Dose de N (N)	0,04 NS	6,75 NS	0,66 NS	1,21 NS	0,62 NS	2,62 NS	0,34 NS	1,38 NS	0,63 NS	4,74 *	0,04 NS	0,18 NS	0,68 NS	0,92 NS	2,93 NS	1,30 NS		
Incorporação (I)	0,69 NS	1,00 NS	0,83 NS	2,27 NS	2,76 NS	0,19 NS	0,09 NS	2,51 NS	0,23 NS	1,62 NS	0,01 NS	2,04 NS	0,70 NS	1,81 NS	3,25 NS	0,06 NS		
N x I	0,17 NS	0,04 NS	0,22 NS	2,61 NS	0,60 NS	1,06 NS	0,36 NS	1,38 NS	0,45 NS	0,95 NS	0,26 NS	1,59 NS	0,02 NS	0,04 NS	2,06 NS	6,32 **		
C.V.(%)	4,26	2,31	9,08	10,68	47,99	42,62	20,65	11,80	34,80	48,76	21,37	16,33	19,59	10,92	23,83	21,41		

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO C - Teores de Cu, Fe, Mn e Zn extraídos com DTPA pH 7,3 de amostras de terra da camada de 0-0,2 m

Tratamentos	Cu		Fe		Mn		Zn	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
	-----mg kg ⁻¹ -----							
Controle	6,8	7,5	46,8	50,7	3,4	10,2	1,0	3,1
AM	7,9	7,6	47,0	53,1	5,7	6,6	1,6	2,6
LE + 0N _{ISA}	5,8	8,8	48,3	55,6	5,1	6,0	4,6	5,5
LE + 0N _{IS60A}	9,0	7,1	44,0	65,1	5,3	8,0	3,4	4,7
LE + 60N _{ISA}	9,0	6,8	51,1	67,1	6,5	7,4	3,9	5,1
LE + 60N _{IS60A}	7,2	8,3	46,1	62,8	4,9	7,3	1,9	5,9
LE + 120N _{ISA}	8,9	8,5	46,8	68,8	4,4	8,3	2,6	5,3
LE + 120N _{IS60A}	11,3	7,1	50,8	55,4	7,3	5,9	4,7	2,7
	ANOVA – Teste F							
Tratamentos	1,04 ^{NS}	3,82 ^{**}	4,47 ^{**}	43,99 ^{**}	17,41 ^{**}	3,05 [*]	8,20 ^{**}	5,77 ^{**}
Trat. Ad. vs. Fat.	0,76 ^{NS}	0,44 ^{NS}	1,04 ^{NS}	110,89 ^{**}	20,87 ^{**}	3,66 ^{NS}	29,97 ^{**}	19,70 ^{**}
Controle vs. AM	0,22 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,01 ^{NS}	2,92 ^{NS}	31,50 ^{**}	9,69 ^{**}	0,84 ^{NS}	0,43 ^{NS}
Dose de N (N)	1,41 ^{NS}	0,66 ^{NS}	3,36 ^{NS}	6,86 ^{**}	2,57 ^{NS}	0,12 ^{NS}	2,78 ^{NS}	3,70 [*]
Incorporação (I)	0,88 ^{NS}	2,93 ^{NS}	3,80 ^{NS}	3,64 ^{NS}	4,45 [*]	0,05 ^{NS}	1,01 ^{NS}	3,43 ^{NS}
N x I	1,31 ^{NS}	11,02 ^{**}	9,86 ^{**}	88,40 ^{**}	29,97 ^{**}	3,85 [*]	10,01 ^{**}	4,72 [*]
CV (%)	40,44	9,76	4,76	3,36	10,74	21,49	32,94	25,94

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO D - CTC calculada (CTC_c), CTC efetiva (CTC_e) e a pH 7 (CTC₇) determinadas em amostras de terra da camada de 0-0,2 m. Valores médios de quatro repetições.

	CTC _c		CTC _e		CTC ₇	
	2002/03	2003/04	2002/03	2003/04	2002/03	2003/04
	-----mmol _c kg ⁻¹ -----					
Controle	78	80	26	33	138	136
AM	82	83	30	32	161	139
LE + 0N _{ISA}	81	80	31	31	135	164
LE + 0N _{IS60A}	79	84	32	42	144	140
LE + 60N _{ISA}	84	84	29	31	145	97
LE + 60N _{IS60A}	78	84	30	41	151	138
LE + 120N _{ISA}	80	88	33	30	145	139
LE + 120N _{IS60A}	81	85	32	40	145	131
	ANOVA – Teste F					
Tratamentos	1,14 ^{NS}	0,94 ^{NS}	0,75 ^{NS}	11,34 ^{**}	3,48 [*]	5,40 ^{**}
Trat. Ad. vs. Fat.	0,07 ^{NS}	0,95 ^{NS}	2,14 ^{NS}	8,36 ^{**}	2,38 ^{NS}	0,13 ^{NS}
Controle vs. AM	2,06 ^{NS}	0,56 ^{NS}	1,44 ^{NS}	0,13 ^{NS}	15,02 ^{**}	0,07 ^{NS}
Dose de N (N)	0,20 ^{NS}	1,73 ^{NS}	0,63 ^{NS}	0,44 ^{NS}	2,09 ^{NS}	9,65 ^{**}
Incorporação (I)	1,81 ^{NS}	0,05 ^{NS}	0,05 ^{NS}	69,94 ^{**}	1,80 ^{NS}	0,20 ^{NS}
N x I	1,81 ^{NS}	0,76 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,04 ^{NS}	0,50 ^{NS}	9,05 ^{**}
C.V.(%)	4,91	6,78	17,45	8,38	5,64	11,76

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO E – Teores de nitrogênio e relação C/N do solo. Valores médios de quatro observações

0-0,2 m	N-orgânico		N-NH ₄		N-NO ₃		N-inorgânico		C/N	
	2002/03	2003/04	2002/03	2003/04	2002/03	2003/04	2002/03	2003/04	2002/03	2003/04
-----mg kg ⁻¹ -----										
T1-Controle	611	621	2,14	2,91	8,57	11,63	10,71	14,54	19	22
T2-AM	589	559	1,83	2,34	7,32	9,37	9,15	11,71	21	28
T3-LE + 0N _{ISA}	736	609	4,37	6,14	6,56	9,21	10,94	15,35	15	32
T4-LE + 0N _{IS60A}	893	750	4,39	5,74	6,59	8,61	10,98	14,35	14	22
T5-LE + 60N _{ISA}	969	692	1,86	1,32	7,44	5,29	9,30	6,61	12	29
T6-LE + 60N _{IS60A}	1089	707	2,04	1,87	8,17	7,47	10,21	9,34	11	31
T7-LE + 120N _{ISA}	1106	609	2,62	10,01	9,27	13,51	11,89	23,51	11	28
T8-LE + 120N _{IS60A}	1084	604	2,20	4,09	7,82	13,70	10,02	17,79	12	23
ANOVA – Teste F										
Tratamentos	11,47**	4,87**	21,07**	8,78**	1,95 ^{NS}	8,41**	1,06 ^{NS}	8,04**	6,95**	5,24**
Trat. Ad. vs. Fat.	53,92**	8,25**	23,50**	7,87*	0,29 ^{NS}	0,96 ^{NS}	0,74 ^{NS}	2,04 ^{NS}	38,19**	3,53 ^{NS}
Controle vs. AM	0,06 ^{NS}	2,93 ^{NS}	0,89 ^{NS}	0,17 ^{NS}	1,73 ^{NS}	0,27 ^{NS}	1,53 ^{NS}	0,25 ^{NS}	3,32 ^{NS}	4,75*
Dose de N (N)	10,69**	5,26*	60,66**	17,43**	4,37*	18,29**	1,21 ^{NS}	16,67**	3,26 ^{NS}	3,86*
Incorporação (I)	2,71 ^{NS}	4,45*	0,14 ^{NS}	5,80*	0,18 ^{NS}	5,86*	0,17 ^{NS}	5,91*	0,01 ^{NS}	9,98**
N x I	1,12 ^{NS}	3,98*	0,84 ^{NS}	6,38**	1,36 ^{NS}	7,58**	1,27 ^{NS}	7,37**	0,30 ^{NS}	5,36*
C.V.(%)	14,24	8,80	17,49	45,38	17,47	39,80	32,75	38,37	21,86	13,21
-----mg kg ⁻¹ -----										
0,2-0,4 m										
T1-Controle	526	605	1,37	6,07	5,49	24,26	6,86	30,33	19	17
T2-AM	611	472	1,21	2,69	4,85	10,77	6,06	13,46	17	20
T3-LE + 0N _{ISA}	658	442	2,12	2,24	3,18	3,36	5,30	5,60	15	17
T4-LE + 0N _{IS60A}	542	664	1,91	2,79	2,86	4,18	4,76	6,97	18	16
T5-LE + 60N _{ISA}	569	526	1,19	2,36	4,76	9,45	5,95	11,81	17	17
T6-LE + 60N _{IS60A}	602	518	1,20	2,30	4,79	9,21	5,98	11,51	17	18
T7-LE + 120N _{ISA}	536	464	1,37	4,10	4,87	14,09	6,25	22,19	18	19
T8-LE + 120N _{IS60A}	553	633	1,79	3,52	6,33	11,78	8,12	15,29	19	18
ANOVA – Teste F										
Tratamentos	1,20 ^{NS}	5,60**	9,39**	5,68**	13,92**	3,90**	6,05**	3,42*	0,60 ^{NS}	0,92 ^{NS}
Trat. Ad. vs. Fat.	0,05 ^{NS}	0,03 ^{NS}	9,70**	24,97**	8,01**	8,81**	1,42 ^{NS}	7,24*	0,30 ^{NS}	0,31 ^{NS}
Controle vs. AM	2,08 ^{NS}	7,41*	0,90 ^{NS}	11,62**	2,21 ^{NS}	7,69*	1,89 ^{NS}	7,35*	0,18 ^{NS}	3,27 ^{NS}
Dose de N (N)	0,94 ^{NS}	0,72 ^{NS}	23,77**	1,22 ^{NS}	37,56**	4,80*	13,88**	4,03*	0,95 ^{NS}	1,08 ^{NS}
Incorporação (I)	0,43 ^{NS}	18,85**	0,49 ^{NS}	0,10 ^{NS}	2,45 ^{NS}	0,31 ^{NS}	1,87 ^{NS}	0,29 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,08 ^{NS}
N x I	1,96 ^{NS}	5,73*	3,54*	0,31 ^{NS}	4,81*	0,45 ^{NS}	4,68*	0,49 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,34 ^{NS}
C.V.(%)	14,24	12,69	15,66	62,48	13,11	61,13	13,30	14,67	18,47	13,01

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO F – Nitrogênio foliar, N-inorgânico no caldo (N-caldo) e produção de colmos (TCH) de cana-de-açúcar nos anos agrícolas de 2002/03 e 2003/04

	2002/2003				2003/2004			
	Nitrogênio foliar		N-caldo	TCH	Nitrogênio foliar		N-caldo	TCH
	4,5 meses	12 meses			4,5 meses	12 meses		
	-----g kg ⁻¹ -----		-----g L ⁻¹ -----	---t ha ⁻¹ ---	-----g kg ⁻¹ -----		-----g L ⁻¹ -----	---t ha ⁻¹ ---
T1-Controle	16,84	10,93	15,65	75	16,22	11,16	10,84	85
T2-AM	17,35	12,43	30,93	109	19,21	10,42	7,64	115
T3-LE + 0N _{ISA}	17,57	12,54	20,12	107	17,63	10,26	11,18	132
T4-LE + 0N _{IS60A}	17,01	12,65	17,89	128	17,41	10,42	5,59	126
T5-LE + 60N _{ISA}	17,57	11,28	22,17	112	17,96	13,43	5,03	128
T6-LE + 60N _{IS60A}	18,36	11,91	17,70	120	19,27	11,07	11,49	117
T7-LE + 120N _{ISA}	18,71	12,62	4,66	114	20,61	11,52	6,80	129
T8-LE + 120N _{IS60A}	17,63	12,11	8,01	118	19,97	11,54	6,43	129
ANOVA- Teste F								
Tratamentos	0,87 ^{NS}	1,04 ^{NS}	11,99 ^{**}	11,87 ^{**}	12,73 ^{**}	1,92 ^{NS}	4,57 ^{**}	10,60 ^{**}
Trat. Ad. vs. Fatorial	1,65 ^{NS}	2,42 ^{NS}	18,14 ^{**}	43,82 ^{**}	10,67 ^{**}	0,93 ^{NS}	3,42 ^{NS}	47,44 ^{**}
Controle vs. AM.	0,27 ^{NS}	3,27 ^{NS}	20,99 ^{**}	27,23 ^{**}	25,77 ^{**}	0,51 ^{NS}	5,10 [*]	20,33 ^{**}
Dose de N (N)	0,93 ^{NS}	0,16 ^{NS}	20,77 ^{**}	0,08 ^{NS}	23,06 ^{**}	3,43 ^{NS}	1,13 ^{NS}	1,38 ^{NS}
Incorporação (I)	0,26 ^{NS}	0,96 ^{NS}	0,34 ^{NS}	8,11 [*]	0,14 ^{NS}	1,45 ^{NS}	0,08 ^{NS}	2,32 ^{NS}
N x I	1,01 ^{NS}	0,15 ^{NS}	1,46 ^{NS}	1,88 ^{NS}	3,21 ^{NS}	1,85 ^{NS}	10,58 ^{**}	0,69 ^{NS}
C.V.(%)	7,70	9,61	27,51	8,22	4,49	13,12	31,84	7,96

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO G – Parâmetros tecnológicos do caldo de cana-de-açúcar (RB855536) cultivada em solo tratado com lodo de esgoto em substituição a fertilização nitrogenada

Tratamento	Brix		Fibra		Pol cana		AR cana		ATR cana		TAH	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
	-----%-----											
	kg ha ⁻¹										t ha ⁻¹	
Controle	23,60	22,83	9,00	14,73	18,37	14,19	0,58	0,30	175	162	13,16	13,80
AM	23,29	23,03	8,50	11,16	18,25	15,71	0,58	0,40	174	171	18,92	19,75
LE + 0N _{ISA}	23,20	23,45	8,78	11,47	18,12	15,85	0,58	0,40	173	174	18,53	23,00
LE + 0N _{IS60A}	23,20	23,28	8,41	10,89	18,20	16,46	0,59	0,33	174	177	22,16	22,21
LE + 60N _{ISA}	23,23	23,13	8,54	10,88	17,94	16,55	0,62	0,30	172	177	19,27	22,60
LE + 60N _{IS60A}	23,49	23,33	8,41	10,07	18,25	16,95	0,61	0,34	174	179	20,88	20,96
LE + 120N _{ISA}	23,26	23,20	8,57	9,79	18,23	16,69	0,58	0,40	174	177	19,81	22,97
LE + 120N _{IS60A}	23,63	23,35	8,63	9,37	18,39	16,98	0,60	0,41	176	179	20,63	23,24
ANOVA – Teste F												
Tratamentos	0,66 ^{NS}	1,68 ^{NS}	1,17 ^{NS}	58,54 ^{**}	0,62 ^{NS}	25,49 ^{**}	3,42 [*]	3,48 [*]	0,58 ^{NS}	19,00 ^{**}	11,77 ^{**}	11,59 ^{**}
Trat. Ad. vs. Fat.	0,37 ^{NS}	8,17 ^{**}	1,63 ^{NS}	206,04 ^{**}	0,70 ^{NS}	118,8 ^{**}	4,31 [*]	0,45 ^{NS}	0,55 ^{NS}	95,69 ^{**}	42,15 ^{**}	55,78 ^{**}
Controle vs. AM.	1,00 ^{NS}	0,83 ^{NS}	3,61 ^{NS}	135,77 ^{**}	0,20 ^{NS}	34,08 ^{**}	0,52 ^{NS}	9,01 ^{**}	0,18 ^{NS}	23,55 ^{**}	26,82 ^{**}	20,70 ^{**}
Dose de N (N)	0,60 ^{NS}	0,40 ^{NS}	0,32 ^{NS}	27,65 ^{**}	0,74 ^{NS}	8,19 ^{**}	7,96 ^{**}	5,32 [*]	0,62 ^{NS}	3,79 [*]	0,06 ^{NS}	1,03 ^{NS}
Incorporação (I)	1,32 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,96 ^{NS}	11,81 ^{**}	1,58 ^{NS}	8,35 ^{**}	0,39 ^{NS}	0,01 ^{NS}	1,71 ^{NS}	6,06 [*]	9,87 ^{**}	1,36 ^{NS}
N x I	0,36 ^{NS}	0,86 ^{NS}	0,67 ^{NS}	0,43 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,37 ^{NS}	1,39 ^{NS}	2,11 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,06 ^{NS}	1,71 ^{NS}	0,60 ^{NS}
C.V.(%)	1,92	1,34	4,28	3,92	1,95	2,26	3,32	14,73	1,87	1,48	8,21	8,80

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO H – Teores foliares de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre em cana-de-açúcar (RB855536) cultivada em solo tratado com lodo de esgoto em substituição a fertilização nitrogenada. Folhas coletadas com 4,5 meses de idade

Tratamento	P		K		Ca		Mg		S	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
	-----g kg ⁻¹ -----									
Controle	1,99	1,21	7,19	7,12	5,05	4,04	3,47	2,87	1,51	1,49
AM	1,66	1,60	9,90	9,41	4,72	4,35	3,29	3,35	1,68	1,73
LE + 0N _{ISA}	1,78	1,98	10,66	10,05	4,02	4,42	2,87	3,21	1,65	1,57
LE + 0N _{IS60A}	1,81	1,64	10,30	10,00	4,35	4,62	3,03	2,79	1,82	1,69
LE + 60N _{ISA}	1,69	1,65	10,40	9,99	3,75	4,21	3,16	2,96	2,03	1,78
LE + 60N _{IS60A}	1,74	1,61	10,13	10,61	4,17	4,26	3,14	3,09	1,90	2,07
LE + 120N _{ISA}	1,63	1,55	10,44	9,85	4,29	4,17	3,01	3,02	1,97	1,70
LE + 120N _{IS60A}	1,48	1,29	10,57	10,92	4,05	3,51	2,91	2,56	1,83	1,90
	ANOVA – Teste F									
Tratamentos	1,82 ^{NS}	2,36 ^{NS}	2,45 ^{NS}	7,28 ^{**}	1,32 ^{NS}	4,33 ^{**}	1,70 ^{NS}	1,25 ^{NS}	9,65 ^{**}	3,44 [*]
Trat. Ad. vs. Fat.	2,23 ^{NS}	2,97 ^{NS}	9,89 ^{**}	31,68 ^{**}	7,02 [*]	0,06 ^{NS}	8,34 ^{**}	0,92 ^{NS}	35,26 ^{**}	4,77 [*]
Controle vs. AM.	4,62 [*]	3,29 ^{NS}	6,89 [*]	14,28 ^{**}	0,41 ^{NS}	2,00 ^{NS}	0,65 ^{NS}	2,40 ^{NS}	4,37 [*]	2,86 ^{NS}
Dose de N (N)	2,36 ^{NS}	3,16 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,39 ^{NS}	0,25 ^{NS}	9,38 ^{**}	1,07 ^{NS}	0,66 ^{NS}	8,97 ^{**}	4,49 [*]
Incorporação (I)	0,06 ^{NS}	2,85 ^{NS}	0,08 ^{NS}	2,49 ^{NS}	0,33 ^{NS}	1,21 ^{NS}	0,01 ^{NS}	1,84 ^{NS}	0,57 ^{NS}	6,68 [*]
N x I	0,54 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,88 ^{NS}	0,49 ^{NS}	4,18 [*]	0,38 ^{NS}	1,14 ^{NS}	4,68 [*]	0,38 ^{NS}
C.V.(%)	12,89	19,83	14,65	8,81	16,74	7,52	9,71	14,85	6,30	11,29

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO I – Teores foliares de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre em cana-de-açúcar (RB855536) cultivada em solo tratado com lodo de esgoto em substituição a fertilização nitrogenada. Folhas coletadas com 12 meses de idade

Tratamento	P		K		Ca		Mg		S	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
	-----mg L ⁻¹ -----									
Controle	0,85	0,77	7,17	9,66	1,35	3,01	0,63	1,35	0,71	1,17
AM	0,39	0,73	9,55	12,46	2,02	2,32	0,79	0,99	0,83	0,94
LE + 0N _{ISA}	0,74	0,80	11,65	12,60	2,64	2,39	0,92	0,78	1,06	1,02
LE + 0N _{IS60A}	0,85	0,86	11,91	12,37	2,71	2,38	0,82	0,90	1,03	0,43
LE + 60N _{ISA}	0,93	0,89	13,68	12,12	2,14	2,54	0,67	0,96	1,00	0,84
LE + 60N _{IS60A}	0,90	0,88	11,67	12,20	2,70	2,83	0,88	0,98	1,07	1,06
LE + 120N _{ISA}	0,92	0,88	11,62	12,46	2,63	2,76	0,93	1,01	1,06	1,10
LE + 120N _{IS60A}	0,86	0,88	10,68	11,57	2,88	3,00	0,91	1,15	1,10	1,11
	ANOVA – Teste F									
Tratamentos	2,77*	1,34 ^{NS}	4,29**	7,13**	7,92**	1,86 ^{NS}	1,90 ^{NS}	3,37*	10,68**	8,25**
Trat. Ad. vs. Fat.	7,79*	7,20*	24,03**	15,19**	47,46**	0,01 ^{NS}	8,69**	7,63*	69,36**	3,39 ^{NS}
Controle vs. AM.	9,61**	0,22 ^{NS}	4,56*	29,75**	6,71*	5,64*	1,70 ^{NS}	7,50*	3,65 ^{NS}	3,96 ^{NS}
Dose de N (N)	0,68 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,39 ^{NS}	0,86 ^{NS}	0,42 ^{NS}	2,90 ^{NS}	0,61 ^{NS}	3,22 ^{NS}	0,70 ^{NS}	10,55**
Incorporação (I)	0,28 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,32 ^{NS}	1,36 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,99 ^{NS}	0,08 ^{NS}	1,58 ^{NS}	0,29 ^{NS}	3,30 ^{NS}
N x I	0,18 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,95 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,29 ^{NS}	0,81 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,03 ^{NS}	13,00**
C.V.(%)	26,27	12,56	14,69	6,10	14,87	15,49	19,52	18,56	8,76	17,24

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

ANEXO J – Teores de macronutrientes no caldo de cana-de-açúcar (RB855536) cultivada em solo tratado com lodo de esgoto em substituição a fertilização nitrogenada

Tratamento	P		K		Ca		Mg		S	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
	-----mg L ⁻¹ -----									
Controle	382	380	810	343	128	123	271	228	154	99
AM	268	151	677	885	103	141	226	288	151	155
LE + 0N _{ISA}	418	177	629	903	125	129	266	235	167	163
LE + 0N _{IS60A}	436	186	623	970	118	159	237	259	178	185
LE + 60N _{ISA}	368	122	579	693	126	139	256	238	202	155
LE + 60N _{IS60A}	440	133	758	713	131	136	274	237	237	154
LE + 120N _{ISA}	415	131	623	595	108	133	224	262	190	179
LE + 120N _{IS60A}	494	105	577	548	125	143	243	281	198	189
	ANOVA – Teste F									
Tratamentos	4,12**	2,53*	0,98 ^{NS}	3,34*	0,86 ^{NS}	0,65 ^{NS}	0,76 ^{NS}	0,92 ^{NS}	5,18**	7,03**
Trat. Ad. vs. Fat.	14,96**	7,42*	2,62 ^{NS}	1,71 ^{NS}	0,58 ^{NS}	0,57 ^{NS}	0,04 ^{NS}	0,10 ^{NS}	17,75**	25,14**
Controle vs. AM.	6,02*	8,61**	1,23 ^{NS}	11,08**	2,57 ^{NS}	0,88 ^{NS}	1,94 ^{NS}	3,24 ^{NS}	0,02 ^{NS}	13,35**
Dose de N (N)	1,19 ^{NS}	0,77 ^{NS}	0,33 ^{NS}	5,15*	0,65 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,95 ^{NS}	1,11 ^{NS}	7,07**	4,02*
Incorporação (I)	4,43*	0,05 ^{NS}	0,37 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,32 ^{NS}	1,25 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,58 ^{NS}	3,03 ^{NS}	1,51 ^{NS}
N x I	0,53 ^{NS}	0,07 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,13 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,77 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,66 ^{NS}	0,57 ^{NS}
C.V.(%)	16,26	63,60	25,74	32,65	17,90	19,50	18,27	18,56	13,55	13,42

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO K - Teores foliares de Cu, Fe, Mn e Zn em de cana-de-açúcar (RB855536) cultivada em solo tratado com lodo de esgoto em substituição a fertilização nitrogenada. Folhas coletadas aos 4,5 e aos 12 meses de idade

<i>4,5 meses de idade</i>								
	Cu		Fe		Mn		Zn	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
-----mg kg ⁻¹ -----								
Controle	37,30	16,03	141,01	383,74	42,04	47,02	15,36	19,87
AM	16,67	45,99	70,02	77,51	41,91	49,39	15,91	18,28
LE + 0N _{ISA}	10,82	24,26	76,47	30,03	45,41	59,89	19,36	31,39
LE + 0N _{IS60A}	11,29	11,37	79,57	28,84	66,33	57,90	27,49	22,98
LE + 60N _{ISA}	11,18	15,54	95,59	10,66	68,01	50,84	32,32	27,58
LE + 60N _{IS60A}	11,70	13,27	75,31	14,21	64,70	53,28	29,88	22,92
LE + 120N _{ISA}	12,44	10,65	57,68	6,66	68,02	57,08	26,49	17,63
LE + 120N _{IS60A}	9,62	9,78	32,30	9,91	55,25	54,61	18,72	22,46
ANOVA – Teste F								
Tratamentos	1,78 ^{NS}	5,82 ^{**}	2,66 [*]	3,53 [*]	5,87 ^{**}	0,95 ^{NS}	13,37 ^{**}	1,67 ^{NS}
Trat. Ad. vs. Fat.	10,91 ^{**}	17,04 ^{**}	5,29 [*]	19,37 ^{**}	23,57 ^{**}	3,92 ^{NS}	55,62 ^{**}	5,47 [*]
Controle vs. AM	0,20 ^{NS}	17,92 ^{**}	6,85 [*]	4,09 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,13 ^{NS}	0,05 ^{NS}	0,12 ^{NS}
Dose de N (N)	0,03 ^{NS}	1,16 ^{NS}	2,52 ^{NS}	0,20 ^{NS}	2,32 ^{NS}	1,12 ^{NS}	11,52 ^{**}	0,74 ^{NS}
Incorporação (I)	0,17 ^{NS}	1,71 ^{NS}	0,82 ^{NS}	0,30 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,10 ^{NS}	3,45 ^{NS}
N x I	0,55 ^{NS}	0,86 ^{NS}	0,31 ^{NS}	0,28 ^{NS}	6,36 ^{**}	0,18 ^{NS}	7,38 ^{**}	0,56 ^{NS}
CV (%)	29,44	54,51	48,88	146,45	17,26	17,01	14,81	27,19
<i>12 meses de idade</i>								
-----mg kg ⁻¹ -----								
Controle	9,89	11,90	78,00	113,00	12,45	26,52	49,98	23,38
AM	14,41	29,94	77,24	51,32	16,89	27,66	17,51	16,65
LE + 0N _{ISA}	27,97	7,35	42,37	25,13	22,88	32,59	18,61	18,82
LE + 0N _{IS60A}	26,67	2,85	111,43	37,64	22,76	24,88	15,86	16,98
LE + 60N _{ISA}	7,44	5,23	31,51	40,10	17,98	24,53	14,26	22,31
LE + 60N _{IS60A}	6,02	4,83	45,28	73,85	21,27	31,54	20,18	24,46
LE + 120N _{ISA}	6,78	6,41	45,44	80,51	20,87	33,49	18,01	23,09
LE + 120N _{IS60A}	7,07	6,27	52,13	62,18	23,29	23,86	19,01	21,91
ANOVA – Teste F								
Tratamentos	12,69 ^{**}	4,85 ^{**}	0,71 ^{NS}	3,00 [*]	1,51 ^{NS}	0,58 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,72 ^{NS}
Trat. Ad. vs. Fat.	0,78 ^{NS}	22,80 ^{**}	2,11 ^{NS}	8,16 ^{**}	8,59 ^{**}	0,11 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,18 ^{NS}
Controle vs. AM	2,66 ^{NS}	10,39 ^{**}	2,06 ^{NS}	3,60 ^{NS}	1,09 ^{NS}	0,03 ^{NS}	2,04 ^{NS}	1,77 ^{NS}
Dose de N (N)	28,20 ^{**}	0,07 ^{NS}	0,08 ^{NS}	3,10 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,34 ^{NS}	1,36 ^{NS}
Incorporação (I)	9,28 ^{**}	0,27 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,49 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,69 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,01 ^{NS}
N x I	9,87 ^{**}	0,19 ^{NS}	0,32 ^{NS}	1,30 ^{NS}	0,15 ^{NS}	1,61 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,18 ^{NS}
CV (%)	35,37	84,68	34,68	51,88	30,01	36,08	27,01	34,10

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO L – Teores de Cu, Fe, Mn e Zn no caldo de cana-de-açúcar (RB855536) cultivada em solo tratado com lodo de esgoto em substituição a fertilização nitrogenada

Tratamento	Cu		Fe		Mn		Zn	
	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
	-----mg L ⁻¹ -----							
Controle	0,32	0,38	9,04	4,23	3,96	2,92	0,87	0,71
AM	0,25	0,37	5,19	5,25	2,79	3,85	0,48	0,84
LE + 0N _{ISA}	0,34	0,27	6,55	4,78	4,00	5,45	1,15	2,56
LE + 0N _{IS60A}	0,32	0,24	6,25	8,81	3,34	5,64	1,04	2,96
LE + 60N _{ISA}	0,32	0,20	7,13	4,89	3,66	4,36	1,32	1,89
LE + 60N _{IS60A}	0,36	0,35	6,21	5,39	3,56	4,16	1,32	2,20
LE + 120N _{ISA}	0,38	0,24	5,85	5,44	3,41	4,43	0,83	1,93
LE + 120N _{IS60A}	0,41	0,26	6,00	8,76	2,92	3,37	1,02	1,82
	ANOVA – Teste F							
Tratamentos	0,28 ^{NS}	0,92 ^{NS}	0,72 ^{NS}	1,15 ^{NS}	1,91 ^{NS}	4,99 ^{**}	3,99 ^{**}	6,48 ^{**}
Trat. Ad. vs. Fat.	0,82 ^{NS}	3,94 ^{NS}	0,49 ^{NS}	1,37 ^{NS}	0,16 ^{NS}	11,93 ^{**}	14,73 ^{**}	34,34 ^{**}
Controle vs. AM.	0,34 ^{NS}	0,01 ^{NS}	3,98 ^{NS}	0,18 ^{NS}	6,85 [*]	2,48 ^{NS}	3,86 ^{NS}	0,09 ^{NS}
Dose de N (N)	0,33 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,79 ^{NS}	2,55 ^{NS}	8,54 ^{**}	4,02 [*]	4,73 [*]
Incorporação (I)	0,06 ^{NS}	0,72 ^{NS}	0,10 ^{NS}	3,65 ^{NS}	2,35 ^{NS}	1,09 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,66 ^{NS}
N x I	0,05 ^{NS}	0,84 ^{NS}	0,08 ^{NS}	0,62 ^{NS}	0,40 ^{NS}	1,19 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,40 ^{NS}
C.V.(%)	54,04	49,05	41,68	56,45	18,39	19,59	27,77	32,63

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

ANEXO M – Teores totais de Cd, Cr, Ni e Pb no solo. Médias de quatro repetições

Prof	Tratamento	Cd		Cr		Ni		Pb	
		02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
-----mg kg ⁻¹ -----									
0-0,2 m	Controle	1,09	0,82	25,11	25,52	13,67	11,12	48,16	48,93
	AM	1,16	1,03	25,33	31,09	12,23	10,85	46,50	51,39
	LE + 0N _{ISA}	1,07	0,92	23,94	27,23	11,12	11,14	46,39	52,22
	LE + 0N _{IS60A}	1,22	0,98	26,63	26,96	11,44	10,69	46,55	50,49
	LE + 60N _{ISA}	1,24	1,19	23,12	26,44	10,56	11,36	41,06	47,04
	LE + 60N _{IS60A}	1,03	0,92	25,22	25,07	9,81	11,40	40,90	52,73
	LE + 120N _{ISA}	1,13	1,09	21,95	26,02	10,55	11,27	41,95	48,43
	LE + 120N _{IS60A}	1,02	1,02	21,73	27,47	10,84	10,54	42,78	49,38
ANOVA – Teste F									
Tratamento		0,88 ^{NS}	1,22 ^{NS}	1,57 ^{NS}	0,95 ^{NS}	4,18 ^{**}	0,64 ^{NS}	2,47 ^{NS}	0,82 ^{NS}
Trat. Ad. vs. Fatorial		0,01 ^{NS}	1,20 ^{NS}	1,63 ^{NS}	1,29 ^{NS}	21,64 ^{**}	0,06 ^{NS}	7,22 [*]	0,03 ^{NS}
Controle vs. AM		0,27 ^{NS}	2,11 ^{NS}	0,01 ^{NS}	4,25 [*]	3,03 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,40 ^{NS}	0,63 ^{NS}
Dose de N (N)		0,38 ^{NS}	0,74 ^{NS}	3,17 ^{NS}	0,26 ^{NS}	1,75 ^{NS}	0,93 ^{NS}	4,77 [*]	0,64 ^{NS}
Incorporação (I)		0,63 ^{NS}	1,27 ^{NS}	1,79 ^{NS}	0,08 ^{NS}	0,01 ^{NS}	1,34 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,84 ^{NS}
N x I		2,24 ^{NS}	1,25 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,49 ^{NS}	0,04 ^{NS}	1,48 ^{NS}
C.V.-(%)		15,52	20,37	11,56	14,16	10,42	7,23	8,35	8,71
Prof	Tratamento	Cd		Cr		Ni		Pb	
		02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04	02/03	03/04
-----mg kg ⁻¹ -----									
0,2-0,4 m	Controle	0,96	0,89	25,46	25,16	10,11	11,24	40,51	43,74
	AM	1,06	0,70	22,82	26,04	9,78	10,58	42,06	44,91
	LE + 0N _{ISA}	1,20	0,90	22,60	26,11	10,68	11,05	43,23	50,83
	LE + 0N _{IS60A}	1,03	0,63	27,45	24,45	9,94	7,37	42,12	44,48
	LE + 60N _{ISA}	0,99	0,42	25,22	24,88	10,95	5,62	43,56	51,29
	LE + 60N _{IS60A}	1,02	0,43	26,44	23,10	11,00	5,22	41,67	50,13
	LE + 120N _{ISA}	1,24	0,42	24,81	23,02	10,77	5,19	42,84	47,78
	LE + 120N _{IS60A}	0,75	0,31	29,41	27,57	10,78	5,19	47,20	50,10
ANOVA – Teste F									
Tratamento		2,21 ^{NS}	8,70 ^{**}	0,78 ^{NS}	1,38 ^{NS}	1,41 ^{NS}	20,20 ^{**}	1,08 ^{NS}	3,26 [*]
Trat. Ad. vs. Fatorial		0,11 ^{NS}	19,16 ^{**}	0,84 ^{NS}	0,48 ^{NS}	5,03 ^{NS}	71,10 ^{**}	1,91 ^{NS}	11,50 ^{**}
Controle vs. AM		0,45 ^{NS}	3,04 ^{NS}	0,50 ^{NS}	0,22 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,54 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,23 ^{NS}
Dose de N (N)		0,81 ^{NS}	15,77 ^{**}	0,31 ^{NS}	0,65 ^{NS}	1,41 ^{NS}	26,12 ^{**}	1,03 ^{NS}	1,59 ^{NS}
Incorporação (I)		6,66 [*]	3,85 ^{NS}	3,14 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,47 ^{NS}	7,12 [*]	0,09 ^{NS}	1,51 ^{NS}
N x I		3,31 ^{NS}	1,64 ^{NS}	0,18 ^{NS}	1,79 ^{NS}	0,61 ^{NS}	5,19 [*]	1,59 ^{NS}	3,20 ^{NS}
C.V.-(%)		19,80	26,22	20,54	10,51	7,72	16,26	8,90	7,20

NS = não significativo; * e ** = significativo a 5% e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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