Campus de São Carlos

UTILIZAÇÃO DE LODO DE LAGOA DE
ESTABILIZAÇÃO NA CULTURA DE SORGO
GRANÍFERO (*Sorghum bicolor*, L. Moench) EM
CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO

Nelson Luiz da Silva

Orientador: Prof. Dr. Valdir Schalch

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 20 / 07 / 01

Ass.: Guilherme

**UTILIZAÇÃO DE LODO DE LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO NA
CULTURA DE SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor*, L.
Moench) EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO**

Nelson Luiz da Silva

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036382

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
para obtenção do Título de Mestre em Hidráulica
e Saneamento

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valdir Schalch

São Carlos
2001

Class.	TE SE - EESC
Cult.	5649
Tombo	T0172/01

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

S586u Silva, Nelson Luiz da
Utilização de lodo de lagoa de estabilização na
cultura de sorgo granífero (*Sorghum bicolor*, L.
Moench) em condições de casa de vegetação / Nelson
Luiz da Silva. -- São Carlos, 2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Valdir Schalch.

1. Lodo de esgoto. 2. Lagoa anaeróbia.
3. Sorgo. 4. Metais pesados. 5. Nutrientes.
6. Produção de matéria. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Licenciado **NELSON LUIZ DA SILVA**

Dissertação defendida e aprovada em 18-05-2001
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **VALDIR SCHALCH** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **JOÃO SERGIO CORDEIRO**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Prof. Adjunto **MARCOS OMIR MARQUES**
(UNESP – Campus de Jaboticabal)

0

Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e amigo Doutor Valdir Schalch pelas orientações e incentivos, para que este trabalho obtivesse êxito.

Ao Professor Doutor Luiz Antônio Daniel, pelo apoio.

Ao Professor Doutor Marcos Omir Marques pelo incentivo, apoio e amizade.

Ao Químico Jenivaldo José do Nascimento pela ajuda na montagem do experimento.

À minha esposa Solange, meus filhos Rodrigo, Thiago e Juliana, pelo carinho, apoio e incentivo.

À Pavi e à Sá, pelas orientações.

Ao Abraão C. Ferreira, pela colaboração na montagem e elaboração dos gráficos e textos.

À SABESP (Lins) pela permissão de freqüentar as aulas e demais atividades durante o curso.

À COOXUPÉ, pela realização das análises laboratoriais da pesquisa.

Ao Fredy Limon pela cessão da área para a pesquisa.

Ao André Luiz, pela colaboração na elaboração dos textos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vi
SIGLAS E ABREVIATURAS.....	vii
LISTA DE APÊNDICE.....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Generalidades.....	4
2.2 Produtos Gerados pelos Tratamentos/Características.....	6
2.3 Produção de Lodo em Lagoas de Estabilização.....	9
2.4 Legislação.....	10
3. POTENCIALIDADES DE USO AGRÍCOLA.....	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4.1 Solo.....	18
4.2 Vasos.....	19
4.3 Lodo de Esgoto.....	19
4.4 Cultura.....	20
4.5 Corretivo da Acidez do Solo.....	20
4.6 Fertilização Mineral.....	21
4.7 Tratamentos e Delineamento Experimental.....	21
4.8 Instalação e Condução do Experimento.....	23
4.9 Coletas de Material e Análises Químicas.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1 Fertilidade do Solo.....	26
5.2 Micronutrientes e Metais Pesados do Solo.....	36
5.3 Crescimento e Produção de Matéria seca pelas Plantas.....	44
5.4 Acúmulo de Macronutrientes nas Plantas.....	47
5.5 Acúmulo de Micronutrientes e Metais Pesados nas Plantas.....	58
6. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
APÊNDICES.....	74

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Esquema de funcionamento (mecanismos) de uma lagoa anaeróbia de estabilização.....	6
FIGURA 2	- Regressão linear entre teores de matéria orgânica do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	27
FIGURA 3	- Regressão linear entre teores de pH do solo e doses de lodo de esgoto, além de valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	29
FIGURA 4	- Regressão linear entre teores de P – resina do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	30
FIGURA 5	- Regressão linear entre teores de potássio do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	31
FIGURA 6	- Regressão linear entre teores de Cálcio do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	33
FIGURA 7	- Regressão linear entre teores de Magnésio do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	33
FIGURA 8	- Regressão linear entre teores de CTC do solo e doses de lodo de esgoto, além de valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	35
FIGURA 9	- Regressão linear entre teores de valores de saturação por bases do solo e dose de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	35
FIGURA 10	- Regressão linear entre teores de Boro no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	37

FIGURA 11	- Regressão linear entre teores de Cobre no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	38
FIGURA 12	- Regressão linear entre teores de Ferro no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	39
FIGURA 13	- Regressão linear entre teores de Chumbo no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	40
FIGURA 14	- Regressão linear entre teores de Níquel no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	41
FIGURA 15	- Regressão linear entre teores de Cádmio no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	42
FIGURA 16	- Regressão linear entre teores de Crômio no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	42
FIGURA 17	- Regressão linear entre teores de Zinco no solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	43
FIGURA 18	- Variação da altura de plantas de sorgo cultivadas ao longo de 124 dias, de acordo com os tratamentos testados.....	45
FIGURA 19	- Regressão linear entre as quantidades de matéria seca produzida pelas folhas e ramos de plantas de sorgo granífero e doses de lodo de esgoto, além dos valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	46
FIGURA 20	- Regressão linear entre as quantidades de matéria seca produzida pelas panículas de plantas de sorgo granífero e doses de lodo de esgoto, além dos valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	46
FIGURA 21	- Regressão linear entre as quantidades de matéria seca produzida pelas raízes de plantas de sorgo granífero e doses de lodo de esgoto, além dos valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	47

FIGURA 22 - Regressão linear entre teores de Nitrogênio em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	48
FIGURA 23 - Regressão linear entre teores de Nitrogênio em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	49
FIGURA 24 - Regressão linear entre teores de Nitrogênio em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	49
FIGURA 25 - Regressão linear entre teores de Fósforo em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	51
FIGURA 26 - Regressão linear entre teores de Fósforo em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	51
FIGURA 27 - Regressão linear entre teores de Fósforo em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	52
FIGURA 28 - Regressão linear entre teores de Potássio em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	53
FIGURA 29 - Regressão linear entre teores de Potássio em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	53
FIGURA 30 - Regressão linear entre teores de Potássio em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	54
FIGURA 31 - Regressão linear entre teores de Cálcio em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	55
FIGURA 32 - Regressão linear entre teores de Magnésio em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....	56

- FIGURA 33 - Regressão linear entre teores de Enxofre em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....57
- FIGURA 34 - Regressão linear entre teores de Enxofre em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....57
- FIGURA 35 - Regressão linear entre teores de Enxofre em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....58
- FIGURA 36 - Regressão linear entre teores do Cobre em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....60
- FIGURA 37 - Regressão linear entre teores do Cobre em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....60
- FIGURA 38 - Regressão linear entre teores do Ferro em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....62
- FIGURA 39 - Regressão linear entre teores do Ferro em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....62
- FIGURA 40 - Regressão linear entre teores do Ferro em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....63
- FIGURA 41 - Regressão linear entre teores do Manganês em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....64
- FIGURA 42 - Regressão linear entre teores do Manganês em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....64
- FIGURA 43 - Regressão linear entre teores do Manganês em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....65

FIGURA 44 - Regressão linear entre teores do Zinco em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....66

FIGURA 45 - Regressão linear entre teores do Zinco em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....66

FIGURA 46 - Regressão linear entre teores do Zinco em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.....67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Valores máximos permissíveis de metais pesados para aplicação de lodo na agricultura.....	11
TABELA 2	- Propriedades químicas do solo utilizado no experimento.....	18
TABELA 3	- Composição química do lodo utilizado.....	20
TABELA 4	- Soluções de nutrientes e respectivas alíquotas adicionadas aos vasos.....	21
TABELA 5	- Quantidades aplicadas por vaso de calcário, lodo de esgoto, P e K nos diferentes tratamentos.....	23
TABELA 6	- Causas de variação e respectivos graus de liberdade, considerados na análise estatística dos resultados.....	23

SIGLAS E ABREVIATURAS

ETEs	- Estação de Tratamento de Esgotos
SABESP	- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
CETESB	- Companhia de Tecnologia e de Saneamento Ambiental
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
USEPA	- United States Environmental Protection Agency
IAC	- Instituto Agronômico de Campinas
IAPAR	- Instituto Agronômico do Paraná

LISTA DE APÊNDICE

APÊNDICE 1 -Propriedades químicas do solo, para fins de fertilidade, em função dos tratamentos testados e comparações estatísticas, ao final dos experimentos.....	74
APÊNDICE 2 -Teores de micronutrientes e metais pesados no solo (mg dm^{-3}), em função dos tratamentos testados e comparações estatísticas, ao final dos experimentos.....	75
APÊNDICE 3 -Altura das plantas de sorgo granífero (m), no decorrer do tempo, a partir da semeadura, em função dos tratamentos testados.....	76
APÊNDICE 4 -Produção de matéria seca, de folhas e ramos, panículas e raízes de sorgo granífero (g vaso^{-1}), em função dos tratamentos e comparações estatísticas.....	77
APÊNDICE 5 -Quantidades totais de nutrientes (g vaso^{-1}), acumulados em folhas e ramos de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos e comparações estatísticas.....	78
APÊNDICE 6 -Quantidades totais de nutrientes acumulados em panículas de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (g vaso^{-1}) e comparações estatísticas.....	79
APÊNDICE 7 -Quantidades totais de nutrientes acumulados em raízes de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (g vaso^{-1}) e comparações estatísticas.....	80
APÊNDICE 8 -Quantidades totais acumuladas de micronutrientes e metais em folhas e ramos de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (mg vaso^{-1}) e comparações estatísticas.....	81
APÊNDICE 9 -Quantidades totais acumuladas de micronutrientes e metais em panículas de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (mg vaso^{-1}) e comparações estatísticas.....	82
APÊNDICE 10 -Quantidades totais acumuladas de micronutrientes e metais em raízes de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (mg vaso^{-1}) e comparações estatísticas.....	83

APÊNDICE 11 -Equações matemáticas e variáveis estatísticas das análises de regressões lineares realizadas.....	84
APÊNDICE 12 -Tipos de lagoas de estabilização mais utilizadas.....	85
APÊNDICE 13 -Assoreamento e desassoreamento da lagoa facultativa de Ibirá-SP.....	86
13a -Assoreamento da lagoa facultativa de Ibirá-SP.....	86
13b -Início do desassoreamento da lagoa facultativa de Ibirá-SP.....	86
APÊNDICE 14 -Panículas de todos os tratamentos aplicados com 124 dias a partir do início do experimento.....	87

RESUMO

O presente trabalho teve como objeto avaliar os efeitos da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto de lagoas anaeróbias sobre a fertilidade do solo, disponibilidade de metais pesados no solo e produção de matéria seca, acúmulo de nutrientes e metais pesados em plantas de *Sorghum bicolor* L. (Moench). Os tratamentos testados foram: 1) Testemunha; 2) Fertilização Mineral; 3) L100 – Lodo de esgoto em quantidade suficiente para fornecer o nitrogênio exigido pela cultura; 4) L200 – O dobro da quantidade de lodo aplicada no tratamento 3; 5) L300 – O triplo da quantidade de lodo aplicada no tratamento 3. O experimento foi conduzido por 124 dias, em condições de casa de vegetação, sendo que o delineamento estatístico adotado foi o de bloco casualizados com 5 tratamentos e quatro repetições, totalizando 20 parcelas. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (Teste F) e, nos casos pertinentes as médias foram comparadas pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade. Procedeu-se à realização da análise de regressão linear entre as variáveis estudadas e as doses de lodo de esgoto. Considerando-se os resultados obtidos no presente trabalho, foi possível elaborar as seguintes conclusões: - A incorporação do lodo de esgoto no solo proporcionou melhorias de algumas variáveis consideradas na avaliação da fertilidade do solo, podendo-se citar: teor de Matéria Orgânica, teor de fósforo disponível, potássio disponível e capacidade de troca de cátions. - Por outro lado, algumas variáveis, também relacionadas à fertilidade do solo, sofreram prejuízos, podendo-se citar: pH, teores de cálcio disponível, magnésio disponível e saturação por bases. Todos os elementos metálicos pesados, presentes no lodo de esgoto tiveram suas disponibilidades aumentadas no solo. - O lodo de esgoto promoveu maior produção de biomassa vegetal de ramos e folhas, panículas e raízes. - O aumento da dose de lodo proporcionou decréscimo no acúmulo de P nas folhas e ramos das plantas de sorgo granífero. Porém, nas outras partes analisadas houve aumento do acúmulo de P. Os totais acumulados de Ca e Mg não foram influenciados pelas doses de lodo de esgoto. Para os demais macronutrientes, o aumento da dose de lodo de esgoto resultou em maior acúmulo nas plantas. - Todos os metais pesados presentes no lodo de esgoto tiveram seus acúmulos aumentados nas diferentes partes das plantas de sorgo granífero, com o aumento das doses de lodo incorporadas nos solos. Entretanto, nenhum teor encontrado foi alto o suficiente para proporcionar o surgimento de sintomas de toxicidade nas plantas. - O lodo de esgoto apresentou bom desempenho como fonte de micronutrientes para as plantas de sorgo granífero.

Palavras-chave: 1. Lodo de esgoto. 2. Lagoa anaeróbia. 3. Sorgo. 4. Metais pesados. 5. Nutrientes. 6. Produção de matéria seca.

ABSTRACT

The object of this study was to evaluate the effects of an application of ever increasing doses of sewer mud of anaerobic ponds on soil fertility, the availability of metals in the soil, the production of dry material, the accumulation of nutrients and heavy metals in the plant, *Sorghum bicolor* L (Moench). The treatments tested were: 1) Witness; 2) mineral fertilization; 3) L100 - Sewer mud in sufficient quantities to provide the nitrogen required by the culture; 4) L200 - a double quantity of sewer mud applied is the treatment 3; 5) L300 - a triple quantity of sewer mud applied in the treatment 3. The experiment was conducted for 124 days in vegetation house conditions. The statistical delineation used was that of causalized blocks of five treatments and four repetitions, totaling 20 blocks. The obtained results were submitted to an analysis of variance (Test F) and in the pertinent cases, the averages were compared by the Tukey Test for a 5% probability. An analysis of the linear regression between the studied variables and the doses of sewer mud were conducted. With the results obtained in this study, it was possible to elaborate the following conclusions: - The incorporation of the sewer mud in the soil provided improvement in some variables used in the evaluation of the soil fertility; variables such as the contents of Organic Matter, the contents of available Phosphorus, the contents of available Potassium and the capacity for cation exchange. - On the other hand, some variables related to soil fertility suffered losses; variables such as pH, the contents of available Calcium, of available Magnesium and base saturation. - All the heavy metal elements, present in the sewer mud, had their availability increased in the soil. - The sewer mud promoted a large production of vegetal biomass of branches, leaves, panicles and roots. - The increase of the sewer mud dose promoted the decrease in the accumulation of P in the leaves and branches of the grain producing sorghum plant. But, for the other parts analyzed, there was an increase in the accumulation of P, the accumulated totals of Calcium and Magnesium weren't influenced by the sewer mud dose. For the other macronutrients the increase dose of sewer mud resulted in larger accumulations in the plants. - All the heavy metals present in the sewer mud had their accumulations increased in the different parts of the grain producing sorghum plants, with the increased doses of sewer mud incorporated in the soil. However, none of contents found were high enough to promote the appearance of toxin symptoms in the plants. - The sewer mud presented a good performance as a source of micronutrients for the grain producing sorghum plants.

Keywords: 1. Sewer mud. 2. anaerobic ponds. 3. Sorghum plant. 4. Heavy metal. 5. Nutrients. 6. Dry matter production.

1. INTRODUÇÃO

A questão de lodo de esgoto no Estado de São Paulo está apresentando uma dimensão bem maior agora, do que nos últimos dez anos, pois sua produção em base seca vem aumentando gradativamente, e já está sendo prevista para o ano de 2005, uma produção estimada de 575 toneladas por dia na Região Metropolitana de São Paulo, 29,5 t dia⁻¹ em algumas importantes cidades, como por exemplo: São José dos Campos, Presidente Prudente, Franca, Botucatu, Assis, Itapeva e Tupã, e ainda 10,7 t dia⁻¹ no litoral, em Comunidades tais como Cubatão, Mongaguá, Caraguatatuba, Ubatuba e Ilha Bela.

O poder público, responsável pelos sistemas de tratamento de esgotos, Governo do Estado e Prefeituras, necessitam encontrar formas para a disposição final dos lodos retirados, principalmente de lagoas de estabilização. As lagoas de estabilização constituem-se nos principais processos de tratamento de esgotos sanitários, os quais visam a remoção de carga orgânica são os mais utilizados no Brasil, e em considerável escala em São Paulo, devido às condições climáticas favoráveis, e operação e manutenção bem mais simples.

A instalação desses sistemas visa atender às necessidades das atividades humanas, no tocante à sua produção de matéria orgânica, as quais compõem as águas residuárias que necessitam de tratamento, e com isso evitar o seu lançamento in-natura nos corpos d'água, o que provocaria impacto ambiental e destruição da vida aquática. Assim, o principal resíduo desse sistema consiste no denominado lodo de esgoto. O lodo de esgoto por sua vez é rico em matéria orgânica e possui uma composição muito

variável, em função da origem dos esgotos (áreas residenciais, industriais e zona rural) e do processo utilizado no tratamento. Dessa forma, em sua composição são encontrados todos os nutrientes considerados essenciais para o crescimento e produção de culturas, assim como os elementos considerados úteis ao desenvolvimento das mesmas. Além dos nutrientes das plantas, o lodo de esgoto, apresenta quantidades significativas de matéria orgânica, que não foi destruída durante a fase de tratamento dos esgotos sanitários.

As lagoas de estabilização, pela simplicidade de operação e bom desempenho, constituem-se nos processos de tratamento de esgotos sanitários mais utilizados no Estado de São Paulo e no Brasil.

Várias são as alternativas para a disposição final desse produto. Entretanto, por questões técnicas e econômicas, a sua utilização em solos cultivados, como fertilizante e/ou condicionador do solo, tem se apresentado como alternativas bastante promissoras.

Essa prática não é novidade, tendo sido já empregada em outros Países, tais como Canadá, Estados Unidos, China, Alemanha, e na Europa, mais avançados tecnologicamente e que enfrentam, há algum tempo, o problema das super populações.

Algumas pesquisas têm demonstrado que o lodo de esgoto não substitui completamente as fontes tradicionais de adubação, no que se refere ao fornecimento de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, etc, atuando mais como um auxiliar da adubação química. Sua aplicação na agricultura também não deve ser realizada de forma indiscriminada. Plantações de hortaliças e vegetações rasteiras, tais como morango, melão e melancia, não são as mais adequadas para essa finalidade. Deve-se reservar para aplicação de lodo, culturas como café, cana de açúcar, milho, florestas, algodão, citrus e sorgo, além de gramados ornamentais e jardins, onde não é permitida a circulação de pessoas.

Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de doses crescentes de lodo de lagoa de estabilização do tipo anaeróbia, em solo cultivado com plantas de sorgo granífero sobre a fertilidade, teores de metais pesados do solo, bem como sobre a composição química das plantas e produção de grãos e biomassa vegetal.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Generalidades

Esgoto é o termo usado para definir ou caracterizar os despejos provenientes dos diversos usos das águas, tais como sanitários, comerciais, industriais, agrícolas, etc.

Os esgotos sanitários são os despejos líquidos constituídos de esgotos domésticos e industriais lançados na rede pública.

O esgoto doméstico é constituído, basicamente de água e matéria orgânica, suspensa ou dissolvida no meio líquido. Produzidos principalmente nas residências, devem ser coletados e encaminhados através de tubulações às estações de tratamento CETESB (1989).

É importante ressaltar que esses efluentes apresentam também em suas composições, organismos vivos patogênicos, transmissores de doenças, o que justifica as preocupações que se tem com esse material e todo o investimento que é feito para o seu tratamento.

Quando lançados sem tratamento nos rios, consomem o oxigênio das águas, inviabilizando toda vida aquática nele existente.

Resumidamente, o processo inicia-se com a decomposição da matéria orgânica a qual serve de alimento para os microrganismos do processo (bactérias, algas, etc.). As etapas posteriores variam de acordo com o processo adotado.

Um dos processos empregados para o tratamento de esgotos constituem-se de lagoas de estabilização.

Essas lagoas são definidas como um corpo de água lenticó, e destinado a armazenar resíduos de esgoto sanitário bruto e sedimentado, despejos industriais orgânicos e oxidáveis, ou águas residuárias oxidadas. Todo o tratamento é feito através de processos físicos, biológicos, e bioquímicos naturais denominados autodepuração ou estabilização. Esses processos, sob condições parcialmente controladas, são os responsáveis pela transformação de compostos orgânicos putrescíveis, em compostos minerais ou orgânicos mais estáveis CETESB (1989).

Os custos de investimentos para implantação de lagoas facultativas, são de R\$ 50,00/habitante, sendo de R\$ 60,00/hab, para sistemas australianos SABESP (1999).

De acordo com a SABESP (1999) esses processos caracterizam-se pelo seu baixo custo operacional (R\$50,00 a R\$ 60,00/habitante).

Conforme se observa no APÊNDICE 12, vários são os tipos de tratamentos realizados em lagoas de estabilização, de acordo com SPERLING (1996), destacando-se as lagoas facultativas, lagoa anaeróbia seguida de facultativa, lagoa facultativa aerada, lagoa facultativa de mistura completa, lagoa de decantação aerada de mistura completa.

Nas lagoas anaeróbias co-existem somente os compartimentos facultativo e anaeróbio, com predominância nítida para a via anaeróbia de degradação da matéria orgânica. A fração orgânica dos sólidos sedimentáveis da lagoa é decomposta pelos microrganismos anaeróbios sendo transformados principalmente em gás metano (CH_4CO_2), (produtos solúveis intermediários da decomposição e material sólido mineralizado).

Tomando-se por base os mecanismos que resultam no tratamento de esgotos em lagoas de estabilização do tipo facultativas, o lodo ocupa o compartimento anaeróbio do processo, cumprindo importante tarefa no tratamento conforme a descrição a seguir (Figura 1).

FIGURA 1 - Esquema de funcionamento (mecanismos) de uma lagoa de estabilização. GONÇALVES (1999)

2.2 Produtos Gerados pelos Tratamentos/Características

De acordo com MELO e MARQUES (1997) lodo de esgoto pode ser definido como sendo o resíduo gerado nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). Na sua composição, que é muito variável, em função da origem dos esgotos (áreas residenciais, áreas industriais, zona rural) e do processo utilizado no tratamento, são encontrados todos os nutrientes considerados essenciais para o crescimento e produção das culturas, assim como os elementos considerados úteis ao desenvolvimento das mesmas. Além dos nutrientes das plantas, o lodo de esgotos, ainda encerra na sua composição grande quantidade de matéria orgânica, não destruída durante a fase de tratamento dos esgotos sanitários.

Ainda, segundo os autores acima mencionados, apesar da falta de investimento em tratamento de esgotos no Brasil, a produção de lodo tem aumentado consideravelmente, sobretudo nos centros mais desenvolvidos do país.

A acumulação de lodo em lagoas facultativas primárias ou anaeróbias não ocorre de forma homogênea no tempo e no espaço. A taxa de acumulação de lodos é influenciada por fatores tais como as características do esgoto, o período de tempo em operação, a eficiência do pré-tratamento, o posicionamento dos dispositivos de entrada e saída, as características geométricas da lagoa, as taxas de carregamento orgânico e hidráulico, entre outros.

A maioria dos relatos sobre a distribuição espacial da camada de lodos em lagoas anaeróbias ou facultativas primárias indica uma acumulação maior nas proximidades dos dispositivos de entrada e saída da lagoa. Exceto nessas regiões da lagoa, a camada geralmente apresenta-se homogênea, com interface sólido-líquido quase que com a mesma cota. A maior acumulação nas imediações da entrada é atribuída à grande quantidade de sólidos sedimentáveis orgânicos e inorgânicos no afluente SILVA, (1983), DA-RIN e NASCIMENTO (1988), SCHNEITER et al. (1993), NASCIMENTO et al. (1999). Entretanto, a ação dos ventos, a inversão de temperatura e o comportamento hidrodinâmico do reator irão se opor a essa tendência. Nos casos em que a entrada do esgoto na lagoa ocorre com muita turbulência (jatos), a camada de lodos pode inclusive apresentar espessura inferior a de outras regiões da lagoa. Esse é o caso descrito por SAQQAR e PESCOD (1995), sobre uma lagoa anaeróbia em operação em ALSAMRA (Jordânia), em que as maiores alturas da camada de lodos foram observadas na região central da mesma.

Outro tipo de distribuição espacial é descrita por PAING et al. (1999), em uma lagoa com volume de 5.083 m³ e 3,1 m de profundidade, no sul da França. Os experimentos realizados através dos pesquisadores acima mencionados indicaram um decréscimo da camada de lodos da entrada (70 cm) para a saída (15 cm). O gradiente da camada de lodos coincidiu com o das concentrações de ácidos graxos voláteis no lodo, que também diminuíram da entrada (>1500 mg HAc⁻/L) para saída (<150 mg HAc⁻/L). Por outro lado,

os autores observaram um gradiente inverso na distribuição espacial da atividade metanogênica do lodo, que apresentou valores da ordem de 1 mg $\text{CH}_4/\text{gSV.dia}$ na região da entrada e superiores a 51 mg $\text{CH}_4/\text{gSV.dia}$ nas imediações da saída. Estes resultados indicam que os diferentes estágios que compõem a digestão anaeróbia ocorrem em diferentes regiões da lagoa, com as etapas de hidrólise e acidificação nas proximidades da entrada e a metanização, mais intensamente na saída da lagoa. A produção de metano por unidade de área foi muito heterogênea em toda a lagoa, apresentando um valor médio de 25 $\text{L/m}^2.\text{dia}$ a 20°C.

GONÇALVES (1999), afirma que a acumulação de lodo em lagoas facultativas primárias ou anaeróbias não ocorre de forma homogênea no tempo e no espaço. Segundo esse autor, a taxa de acumulação de lodos é influenciada por fatores tais como as características do esgoto, o período de tempo em operação, a eficiência do pré-tratamento, o posicionamento dos dispositivos de entrada e saída, as características geométricas da lagoa, as taxas de carregamento orgânico e hidráulico, entre outros.

WILSON et al. (1980) ao analisar amostras de lodo de esgoto bruto e digerido, concluíram que os metais pesados são um possível problema para a aceitação do lodo como fertilizante, apesar de sua composição possuir, componentes que lhe conferem fertilidade.

DEFELIPO et al. (1991) testando o lodo de esgoto como fertilizante, em dois solos de cerrado, no cultivo de sorgo, concluíram que este aumentou a produção de matéria seca e serviu como fonte de P, Fe, Zn, Mn e Cu para tal cultura.

Segundo GALLOWAY e JACOBS (1977) os metais pesados que mais aparecem no lodo são: Cd, Cu, Mo, Ni, Zn e Pb, além de Mn, Fe, Cr e Hg, além de outros menos frequentes.

Por outro lado BETTIOL e CARVALHO (1982) afirmam que a maior ou menor concentração de metais pesados no lodo é função da maior ou menor participação de esgotos industriais sobre os domésticos.

2.3 Produção de Lodo em Lagoas de Estabilização

Os processos de tratamento de esgoto em suas diversas fases geram lodos com características, e quantidades variáveis, sendo que geralmente, o volume produzido aumenta com o nível de tratamento MELO (1996)

Segundo GONÇALVES (1999), o lodo é o material que se deposita no fundo das lagoas de estabilização ao longo dos anos de funcionamento, constitui-se de compostos inorgânicos, compostos orgânicos aportados pelo esgoto, microrganismos, e sub-produtos de suas atividades.

ARCEIVALA (1981) e SILVA (1985), observaram através de medições feitas em duas lagoas facultativas, no Estado de São Paulo, uma elevação média em torno de 1,5 a 2,3 cm por ano. De acordo com os autores, a menos que uma lagoa esteja saturada (com carga elevada), o lodo se acumulará por diversos anos sem necessidade de remoção.

Através de testes batimétricos realizados pela SABESP (2001) Lins, em lagoas facultativas, foram encontrados os seguintes volumes de lodo, em cada sistema estudado, descritos a seguir:

Monte Verde Paulista:	800 m ³
Macedônia:	1.200 m ³
Riolândia :	2.500 m ³
Valentim Gentil:	1.100 m ³

SILVA (1983), afirma que os lodos retirados de lagoas primárias em geral apresentam elevados teores de sólidos totais (ST>15%) e baixos teores de sólidos voláteis (SV<50% ST).

Em Riolândia-SP, foi realizada uma experiência pela SABESP Lins-SP, onde utilizou-se o efluente de esgoto tratado na lagoa de estabilização local, constituída por sistema australiano, no plantio de milho. A produtividade do milho teve um acréscimo de 40%, sem que tivesse sido realizada qualquer complementação com fertilizantes minerais.

2.4 Legislação

Em São Paulo, a Norma CETESB (1999), regulamenta a disposição de biossólidos na agricultura. Os teores de metais pesados permitidos no mundo, são vistos na Tabela 1.

TABELA 1 - Valores máximos permissíveis de metais pesados para aplicação de lodo na agricultura

País	Concentração máxima permissível de metais em solos agrícolas (mg/ha)											
	Arsênio	Cádmio	Cobalto	Cromo	Cobre	Ferro	Mercúrio	Molibdênio	Níquel	Chumbo	Selênio	Zinco
Comunidade Européia	-	0,15	-	-	12		0,1	-	3,0	15	-	30
Bélgica	-	0,15	-	2,0	12		0,1	-	3,0	15	-	30
Dinamarca	-	0,01	-	-	-		0,01	-	0,08	0,6	-	-
Inglaterra	0,7	0,15	-	40	7,5	20	0,1	0,2	3,0	15	0,015	15
Alemanha	-	0,03	-	2,0	2,0		0,04	-	0,33	2,0	-	5,0
França	-	0,06	-	3,0	3,0		0,03	-	0,6	2,4	0,3	9,0
Grécia	-	0,15	-	-	12		0,1	-	3,0	15	-	30
Itália	-	0,04	-	3,0	4,5		0,025	-	1,2	3,0	-	9,0
Holanda	0,02	0,01	-	1,0	1,2		0,01	-	0,2	1,0	-	6,0
Noruega	-	0,02	0,04	0,4	3,0		0,01	-	0,2	0,6	-	6,0
Suécia	0,3	0,04	-	1,6	2,0		0,015	0,05	0,5	1,6	0,08	5,0
Escócia	-	0,015	0,05	1,0	3,0		0,008	-	0,5	0,3	-	10
Suíça	-	0,075	0,25	2,5	2,5		0,025	0,05	0,5	2,5	-	2,5
Áustria	-	0,04	-	1,9	1,9		0,04	-	0,4	1,9	-	7,5
Finlândia	-	0,12	0,4	4,0	12		0,1	-	2,0	4,8	-	20
Canadá	0,33	0,1	0,66	4,7	3,3		0,02	0,1	0,8	2,2	0,06	8,0
Estados Unidos	2,0	1,9	-	-	75		0,85	0,90	21	15	5,0	140
São PauloA Norma CETESB (1999)	2,0	1,9	-	-	75		0,85	-	21	15	5,0	140

Fonte: WEBBER (1991), U.S.EPA-40 CFR Part 503 (1993), CETESB (1999)

3. POTENCIALIDADES DE USO AGRÍCOLA

Segundo MELO e MARQUES (1997) a utilização do lodo de estações de tratamento de esgotos como condicionador de solos agrícolas é prática já desenvolvida em diversos países do mundo como Estados Unidos da América, Inglaterra, Japão, Austrália, Canadá.

Dentre as principais alternativas de aproveitamento ou destino final do lodo de esgotos, pode-se destacar seu uso na agricultura (aplicação direta no solo), em áreas de reflorestamento, produção de compostos ou fertilizantes organo-mineral, solo sintético para agricultura (processo N-Viro), disposição em aterros sanitários (aterros exclusivos, e co-disposição com lixo urbano), e para reuso industrial (produção de agregado leve para construção civil), fabricação de tijolos e cerâmicas, incineração, restauração de terras, controles de voçorocas, e conversão de lodo em óleo combustível. SABESP (1999).

Na SABESP-SP, está em andamento uma pesquisa através da Unidade de Negócio Oeste, sobre aplicação de biossólido no plantio de eucaliptos, com utilização do lodo proveniente da ETE de Barueri-SP. No exterior, sabe-se que a União Econômica Européia proibirá que todos seus Países membros não mais poderão fazer a disposição dos seus resíduos recicláveis, em aterros sanitários, a partir de 2002. Na mesma linha, também os Estados Unidos estabeleceram o prazo limite de 2004.

No último Seminário sobre Gerenciamento de Biossólidos no Mercosul, ocorrido em Campinas - SP, em setembro/99, as conclusões foram unânicas de que a melhor alternativa para a disposição do biossólido é para usos agrícolas, sempre respeitadas as condições adequadas de aplicação, sem

comprometer a qualidade do meio ambiente local. Quando isto não for possível, serão adotadas algumas alternativas de disposição mencionadas anteriormente. A utilização do lodo de estações de tratamento de esgotos como condicionador de solos agrícolas é prática já desenvolvida em diversos países do mundo, como Estados Unidos, Canadá, Japão, Austrália entre outros.

CARVALHO e BARRAL (1981) acrescentam que o lodo, quando decomposto no solo, produz agentes complexantes e esses facilitam a mobilidade dos fosfatos combinados com o ferro e o alumínio, permitindo um melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, em decorrência da gradual liberação dos mesmos através do processo de degradação da matéria orgânica. Concordando com BERRY (1977), ressaltam também o desempenho do lodo de esgoto quando empregado na restauração de solos grandemente degradados como resultante da mineralização, quando sua camada superficial é removida.

Segundo MERRIL et al. (1969); MOREL (1978), SANTOS (1979) e CARVALHO e BARRAL (1981) a reutilização do lodo como fertilizante surge como a mais promissora dada, principalmente, à importância da reciclagem de nutrientes embutida nesta prática. TAYLOR et al. (s.d) considera ter o lodo de esgoto de 2,0 à 6,0% de Nitrogênio no material seco. Já para o USDA (1980) esses valores são, em média, 4% N, 2% P, 0,4% K e 25% C.

MARQUES (1996) afirma que a eficiência relativa do lodo de esgoto como fonte de fósforo, no primeiro cultivo, em comparação ao adubo fosfatado solúvel em água varia de 20 a 80 %, em função do tipo de solo, do clima e da cultura.

KIEHL (1985) mostra que o lodo de esgoto primário, sem compostar, pode atuar no controle de patogênicos (*Salmonella*) e ovos de helmintos quando empregado no preparo de um composto organo-mineral com 70 % e 30 % de lodo digerido, pois houve sua eliminação total no experimento realizado. O autor mostra ainda que o lodo de esgoto primário

induz a um controle biológico do *Pythium arrhenomanes* Dreschs, quando se comparou a aplicação de um solo infestado e não infestado.

BETTIOL e CARVALHO (1982) encontraram os seguintes valores médios: Sólidos totais = 39,87%; Matéria orgânica = 31,74%; P_2O_5 = 2,60%; Nitrogênio = 1,26%; K_2O = 0,31%; Magnésio = 6.000 ppm; de Zinco = 4.151 ppm; Cobre = 1.039 ppm; Chumbo = 730 ppm; Níquel = 562 ppm; Ferro = 54.400 ppm; Manganês = 400 ppm; Cobalto = 30 ppm; Cádmio = 11 ppm; e Cromo = 884 ppm. Ressaltam, ainda, que além dos nutrientes essenciais às plantas, a matéria orgânica presente confere, ao mesmo, características de condicionador de solos.

HATORI e MUKAI (1986), estudando a decomposição de lodos de esgoto no solo influenciado pela sua matéria orgânica, obtiveram, através da análise química destes, que os teores de Matéria orgânica e o Nitrogênio orgânico foram similares entre os lodos estudados, cujas as quantidades, especialmente para a Matéria orgânica total variaram amplamente, sendo que a taxa de mineralização do Carbono orgânico relacionou-se negativamente com a soma dos conteúdos de Matéria orgânica e lignina do lodo; e a do Nitrogênio orgânico correlacionou-se com teor de proteína bruta contido na matéria orgânica total do lodo.

VANZOLINI (1994) estudando a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça na cultura de sorgo granífero afirmou que essa associação com vinhaça provocou alterações nas características do solo estudado, exercendo efeito positivo na saturação por bases (V%). Nesta pesquisa autora também mostra que o emprego de lodo de esgoto produziu efeito significativo nas características estudadas na parte aérea (matéria seca e nutrientes), e também no sistema radicular das plantas de sorgo, mostrando que esses resíduos orgânicos liberam elementos químicos (metais pesados) que podem ser absorvidos pelas plantas.

MAGDOFF e AMADON (1980), relatam que a produção de milho e centeio cultivados em solo arenoso ao qual se adicionou lodo de

esgoto tiveram suas produções maiores do que nas parcelas fertilizadas com nitrato de amônio.

O Nitrogênio disponível a partir do lodo de esgoto foi similar ao suprido pelo fertilizante nitrato de amônio. Os autores concluíram que o aumento na produção foi devido a outros fatores tais como aumento no suprimento de Potássio e Nitrogênio residual do solo.

CARVALHO (1982) salienta que, embora a utilização de lodo de esgoto, como fertilizante seja prática usual nos países mais desenvolvidos (Europa, América do Norte), em países tropicais, onde o tratamento de esgoto não é usual, a valorização agrícola do lodo necessita de uma sólida experimentação antes de sua implementação. Salienta ainda que, os aspectos a serem pesquisados são: o sanitário, a presença de metais pesados, o efeito sobre as propriedades físicas do solo e metabolismo das plantas, além dos resultados agronômicos propriamente ditos.

BETTIOL e CARVALHO (1982) encontraram de 40 à 60% de matéria orgânica em lodo de esgoto. Ainda afirmam que este subproduto deverá ser um problema que exigirá mais estudos, para que se encontre a melhor maneira para seu destino. Entre as varias alternativas disponíveis a mais viável tecnicamente é a compostagem ou o emprego direto como fertilizante. Entretanto, o composto incorporado ao solo deve estar suficientemente maduro, caso contrário poderá causar danos severos às plantas e redução no crescimento.

SABBEY (1974) afirma que o lodo de esgoto, quando usado como fertilizante, além de atuar como fonte de N, P, K, S, etc. influi sobre as propriedades físicas dos solos. Segundo BETTIOL et al. (1983) esta influência se dá aumentando a estabilidade dos agregados, mudando sua estrutura, agindo diretamente sobre as características hídricas e distribuição das raízes.

CUNNIGHAM et al. (1975), obtiveram decréscimos de produção de milho e de centeio com a aplicação de lodo de esgoto com

elevados teores de Zn e Cu na dose de 63 t/ha. Segundo estes autores a interação desses nutrientes influi negativamente no rendimento das culturas.

BERNARDES (1982) afirma ocorrer diminuição da densidade dos solos, aumento de agregados, notando melhoria na aeração e renovação do sistema.

Em Toronto e Alberta (Canadá), são utilizados na agricultura, 60 e 100%, respectivamente.

No Brasil, dado ao pequeno número de estações de tratamento de esgotos existentes, esta forma de reciclagem vem sendo praticada em Brasília, Estado de São Paulo, Espírito Santo e no Paraná.

A aplicação de lodo na agricultura, se considerada sob seus aspectos positivos e negativos, deve ser enfocada sob vários fatores que norteiam os processos relativos às implicações que essa alternativa de utilização apresenta, dentre os quais, ANDREOLI et al. (1991), destacam que a reciclagem do resíduo, disposição do lodo de esgoto higienizado na agricultura é uma forma mais adequada do que a disposição oceânica, por exemplo; a ação benéfica sobre as propriedades físico-químicas do solo, onde há o favorecimento da penetração das raízes no solo, e da vida microbiana, através do aumento da matéria orgânica presente no lodo, condicionando o solo quanto à capacidade de retenção de água, o que permite maior resistência da planta às secas.

Outros fatores também devem ser destacados, como por exemplo o aumento da produtividade agrícola, pela ação da matéria orgânica e dos nutrientes, em culturas como milho e feijão, o que concede maiores benefícios econômicos aos agricultores que se utilizam dessa alternativa. Algumas implicações negativas são destacadas pelos autores, como a contaminação através de patógenos, mas que podem ser eliminados pela aplicação de cal em doses corretas desse produto, mas nesse caso, maior atenção deve ser dada aos helmintos, em razão da sua resistência à calagem; também merecem destaques a contaminação por metais pesados, atração de insetos e vetores, emissão de

maus odores que pela ordem podem trazer conseqüências tais como absorção dos metais pesados pela planta e também podem provocar doenças transmitidas por vetores, principalmente através de dípteros. A aplicação de lodo ou biossólido também poderá provocar a resistência do agricultor na sua aceitação, temendo a desvalorização dos seus produtos tratados com esse insumo; por outro lado, impactos estéticos e sociais sobre a população devem ser mencionados, como por exemplo no que se refere a saúde pública, legislação, e incômodos eventualmente provocados pela aplicação do lodo de esgoto na agricultura.

A bibliografia nacional apresenta experimentos de várias culturas com utilização de lodo de esgotos na agricultura, demonstrando sua viabilidade para esse fim.

O feijão, consorciado com a bragatina (*Mimosa scabrela*), foi testado pela EMBRAPA-CNP Florestas, no Estado do Paraná, sendo que sua produção chegou a dobrar, em relação à testemunha (talhão de terra sem nenhum tratamento). No entanto, as pesquisas do IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) e EMATER (Paraná) mostram também que outras culturas dão boas respostas quanto ao emprego de lodo como fertilizante orgânico, como por exemplo, o trigo, sorgo, cana e gramíneas. Dentre essas culturas, houve destaque para o milho, principalmente para silagem, com aumento de até 60% na produção.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A experiência foi desenvolvida em casa de vegetação instalada no Município de Promissão – S.P, nas dependências da Chácara do Curtume USIBRAS.

O experimento foi conduzido por quatro meses, tendo sido iniciado em quatro de julho, com o plantio do sorgo. O encerramento se deu em vinte e três de outubro de 2000, ocasião em que se coletou amostra de solo e de plantas (solo panículas, ramos e folhas, raízes).

4.1 Solo

Utilizou-se para o experimento um de um Latossolo Vermelho Amarelo, eutrófico, A moderado, textura média, da mesma propriedade em que foi instalado o experimento.

A amostra de terra foi coletada na camada arável (0-20 cm de profundidade), em uma área cultivada há muitos anos com laranjeiras e que não vinha recebendo fertilização de qualquer natureza.

Na Tabela 2 são apresentadas algumas propriedades químicas do solo utilizado.

TABELA 2 - Propriedades químicas do solo utilizado no experimento

pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	Sb	T	V	S	Fe	Mn	Zn	Cu	B
CaCl ₂	H ₂ O	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³					%	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³				
4,6	5,5	11	4	0,3	6	5	4	11	29	39	3	39	1,6	0,6	0,2 0,11

4.2 Vasos

Foram empregados vasos plásticos com capacidade de 10 litros, o quais foram mantidos sobre um ripado, à uma altura de aproximadamente um metro do solo.

4.3 Lodo de Esgoto

O lodo de esgoto digerido, seco ao ar foi obtido junto à lagoa de estabilização de esgoto (anacróbia aerada) da SABESP, localizada no Município de URÂNIA, Estado de São Paulo, a qual apresenta os seguintes parâmetros de projeto: área média de 0,2432 ha; volume útil de 2.676 m³; Demanda Bioquímica de Oxigênio afluente de 509 mg L⁻¹; taxa de aplicação superficial de 1.412 Kg de DBO/ha/dia; tempo de detenção hidráulico de 3 dias, pertencente à Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP.

Inicialmente, o lodo utilizado, foi seco ao ar livre, por dez dias, peneirado (malha com diâmetro de 2 mm), com o intuito de remover as impurezas grosseiras, tais como : pedaços de madeira, ferro, plásticos, e outros sólidos grosseiros.

A tabela 3 apresenta as características químicas do lodo utilizado no experimento.

TABELA 3 - Composição química do lodo utilizado

Carbono Orgânico (g kg ⁻¹)	194,11
Nitrogênio Kjeldahl (g kg ⁻¹)	23,69
Fósforo total (g kg ⁻¹)	3,2
K total (g kg ⁻¹)	5,77
Ca (g kg ⁻¹)	13,33
Mg (g kg ⁻¹)	3
S-sulfato (g kg ⁻¹)	1,55
Cobre (mg kg ⁻¹)	61,33
Zinco (mg kg ⁻¹)	324,17
Molibdênio (mg kg ⁻¹)	1,43
Ferro (mg kg ⁻¹)	27,63
Manganês (mg kg ⁻¹)	395
Crômio (mg kg ⁻¹)	185,75
Cádmio (mg kg ⁻¹)	1,58
Níquel (mg kg ⁻¹)	25,83
Chumbo (mg kg ⁻¹)	1,43
Umidade	4,67 %
pH em água	6,48

4.4 Cultura

A planta utilizada foi o sorgo granífero, *Sorgum bicolor* L. (Moench) safra 1999, lote 291171, pureza mínima de 98 %, teste de germinação máxima de 80 %, AGROCERES, com as seguintes características principais: ideal para utilização em silagem ou grão, 65 dias de florescimento; ciclo de 120 dias entre plantio e colheita.

4.5 Corretivo da Acidez do Solo

Para a correção da acidez do solo aplicou-se calcário dolomítico calcinado (7 g/vaso) visando elevar a saturação por bases (V %) a 70%. O corretivo utilizado apresentava 80% eq CaCO₃; 43% CaO + MgO; 280 g/Kg Ca + Mg (RAIJ, 1985).

4.6 Fertilização Mineral

A fertilização mineral utilizada foi à base de uréia, superfosfato simples e KCl, sendo que esta foi realizada apenas no tratamento correspondente à fertilização mineral (T2).

As doses recomendadas basearam-se nas recomendações de Vitti, citado por SILVA (1991).

As quantidades aplicadas, por vaso seguiram as recomendações contidas na Tabela 4.

TABELA 4 - Soluções de nutrientes e respectivas alíquotas adicionadas aos vasos

Elemento	Fonte	ppm no Solo	mL ou g / Vaso ⁻¹
N	A	310	300 mL
P	ST	196	10,18 g
K	B	158	45,0 mL
Ca	I	75	-----
Mg	I	15	-----
S	I	50	-----
B	C	0,5	30 mL
Cu	C	1,5	30 mL
Mn	C	3,0	30 mL
Mo	C	0,1	30 mL
Zn	C	9,4	30 mL
Fe	D	5,0	10 mL

Fonte: SILVA (1991)

4.7 Tratamentos e Delineamento Experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso sendo as parcelas distribuídas com cinco tratamentos e quatro repetições, totalizando vinte vasos, parcelas experimentais.

Nos solos devidamente corrigidos quanto à acidez, procedeu-se à realização dos seguintes tratamentos 1) testemunha – o solo, em suas condições naturais, recebeu apenas calcário, conforme descrito item 4.6; 2) Fertilização mineral (FM) – procedeu-se à aplicação de fertilizantes

minerais, através das soluções relacionadas na Tabela 4. Nitrogênio e Potássio foram aplicados de forma parcelada. Para o N procedeu-se à aplicação de 1/3 na semeadura, 1/3 da dose 30 dias após e o restante da dose, 60 dias após a semeadura. Para o Potássio, aplicou-se 1/3 da dose, 30 dias depois.

Os demais elementos foram aplicados na dose recomendada, por ocasião da semeadura. As quantidades aplicadas por vaso constam da Tabela 5; 3 L100 – procedeu-se à incorporação no solo (10 Kg) de 465 g de lodo de esgoto, seco ao ar contendo quantidade de Nitrogênio equivalente à quantidade aplicada no tratamento 2, considerando-se que 1/3 do Nitrogênio total do lodo torna-se-ia disponível às plantas; 4) L200 – procedeu-se à uma incorporação no solo (10 Kg), de 930 g de lodo de esgoto, seco ao ar, contendo quantidade de Nitrogênio equivalente ao dobro da quantidade aplicada no tratamento 2, considerando-se a mesma premissa a respeito da disponibilidade do Nitrogênio do lodo, no solo; 5) L300 – procedeu-se a incorporação no solo (10 Kg) de 1350 g de lodo de esgoto, seco ao ar, contendo Nitrogênio em quantidade equivalente ao triplo daquela aplicada no tratamento 2, considerando-se a mesma premissa a respeito da disponibilidade do Nitrogênio do lodo no solo.

Nos vasos em que se realizaram os tratamentos 3 e 4, procedeu-se à complementação de P e K com superfosfato simples e KCl, respectivamente. Os demais vasos em que se utilizou o tratamento 5 receberam a suplementação de K na forma de KCl. As quantidades aplicadas constam da Tabela 5

TABELA 5 - Quantidades aplicadas por vaso de calcário, lodo de esgoto, P e K nos diferentes tratamentos

Tratamentos	Calcário Calcinado	Fertili- zação Mineral	Lodo de Esgoto base seca (g/vaso)	Complementação Mineral		Va- sos	Va- sos	Va- sos	Va- sos
				P	K	Nº	Nº	Nº	Nº
1 (Testemunha)	7,0 g/vaso	-	-	-	-	5	6	15	16
2 (Fertilizante)	7,0 g/vaso	Conforme Tabela 4	-	-	-	4	7	14	17
3 (Lodo 100% N)	7,0 g/vaso	-	465	1030 mg	1580 mg	3	8	13	18
4 (Lodo 200% N)	7,0 g/vaso	-	930	100 mg	1580 mg	2	9	12	19
5 (Lodo 300% N)	7,0 g/vaso	-	1395	-	1580 mg	1	10	11	20

A análise estatística dos resultados realizou-se através da análise de variância (Teste F), de acordo com a Tabela 6. Nos casos pertinentes procedeu-se a aplicação do teste de Tukey, ao nível de 5%, para a comparação de médias. Foram realizadas análises de regressão linear entre as variáveis estudadas e as doses crescentes de lodo de esgoto.

TABELA 6 - Causas de variação e respectivos graus de liberdade, considerados na análise estatística dos resultados

Causas de Variação	Graus de Liberdade
Blocos	3
Tratamentos	4
Resíduo	12
Total	19

4.8 Instalação e Condução do Experimento

Inicialmente procedeu-se a peneiragem da terra (malha = 2 mm). Em seguida procedeu-se à pesagem de 10 Kg de terra, às quais foram contidas nos respectivos vasos numerados de 1 a 20, passando-se a agrupá-los de

acordo com o sorteio prévio realizado dos vasos que integrariam as quatro repetições de cada tratamento.

Pela ordem, procedeu-se à incorporação, no total de terras de cada vaso, do calcário (todos o vasos), fertilizantes (vasos do tratamento FM) e lodo de esgoto = complementação mineral (Tratamentos L100 , L200 e L300).

Em 04/07/00, após a perfeita homogeneização, as misturas foram retornadas aos vasos, passando-se à semeadura de 5 sementes por vaso, na profundidade aproximada de 5 cm.

Procedeu-se à irrigação dos vasos com água destilada, em quantidade suficiente para que se atingisse 70% da capacidade máxima de saturação.

Durante toda a condução do experimento, procedeu-se à reposição da água evapotranspirada, cujo controle se realizou através de pesagens diárias dos vasos, evitando-se assim que ocorresse percolação e drenagens diárias da água, fato esse que promoveria remoção de nutrientes.

A germinação iniciou-se 10 dias após a semeadura. Depois de 12 dias, procedeu-se ao desbaste, mantendo-se 2 plantas por vaso. Procurou-se manter plantas saudas e de portes similares.

Periodicamente, foram medidas as alturas das plantas, sendo os valores anotados e utilizados para a realização de curvas de crescimento das plantas em função dos tratamentos testados

4.9 Coletas de Material e Análises Químicas

Em 23/10/00, 124 dias após a germinação, o experimento foi desmontado, coletando-se amostras de solo e de plantas.

A coleta das amostras de solo foi realizada inserindo-se verticalmente no solo, um tubo de PVC de diâmetro de 2".

As amostras de terra, secas ao ar, foram peneiradas (malha 2 mm) e encaminhadas ao laboratório, onde se procedeu às análises para avaliação de fertilidade (macro e micronutrientes), segundo metodologia proposta por RAIJ et al. (1987) e IAC (1994), respectivamente. Os metais pesados foram analisados com extração prévia realizada de acordo com metodologia proposta em MELO et al. (1994), e leitura em espectrofotômetro de absorção atômica.

As diferentes partes (folhas e ramos; panículas) das plantas foram coletadas, lavadas com água, água destilada e água desmineralizada, nessa ordem, mantidas em repouso por 24 horas para a drenagem do excesso de umidade, e transferidas para estufa com recirculação de ar a 65-70°C, até peso constante.

No caso das raízes, inicialmente procedeu-se à lavagem com água, solução de HCl 0,1 N, novamente com água, seguindo-se água destilada. Então se procedeu a secagem conforme descrito anteriormente.

Uma vez atingido peso constante, a matéria seca (folhas e ramos, panículas e raízes) foi quantificada através de pesagem e em seguida, moídas em moinho tipo Willey.

O material moído submetido à digestão sulfúrica para determinação de Nitrogênio e nítrico-perclórico, para a determinação de demais elementos, de acordo com a metodologia proposta por MALAVOLTA et al. (1997). O Nitrogênio foi determinado destilando-se o extrato sulfúrico obtido e titulando o destilado coletado em solução de ácido bórico, com H_2SO_4 0,02 N.

No extrato nítrico perclórico, os teores de P foram determinados por colorimetria e S por turbidimetria. Os demais elementos foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fertilidade do solo

Nas figuras 2 a 9 são apresentadas retas obtidas através de análises de regressão linear entre variáveis do solo e doses crescentes de lodo de esgoto. Também são apresentados, na forma de histograma, os valores encontrados nas parcelas que receberam fertilizantes minerais. As médias obtidas para os diferentes tratamentos, as comparações estatísticas pelo teste de Tukey e os resumos das análises estatísticas realizadas são apresentados no APÊNDICE 1.

Matéria Orgânica

Apesar do lodo de esgoto conter teores apreciáveis de matéria orgânica ($194,11 \text{ g Kg}^{-1}$), depois de 124 dias da incorporação das doses de lodo e do cultivo das plantas de sorgo, os teores de matéria orgânica encontrados no solo, tenderam a ser maiores nas parcelas que receberam lodo. Entretanto, estatisticamente, esses teores foram superiores apenas aos encontrados nas parcelas que receberam fertilizantes minerais (APÊNDICE 1). Considerando-se que se trata de um solo de textura média, estes teores, inclusive os encontrados nas parcelas com lodo, encontram-se dentro dos limites considerados normais por RAIJ et al. (1996).

Na Figura 2 encontra-se a reta obtida por análise de regressão entre teores de matéria orgânica do solo e doses de lodo de esgoto, além do teor de matéria orgânica das parcelas que receberam fertilizantes minerais.

Verifica-se que há uma tênue tendência de aumento da matéria orgânica do solo ao mesmo tempo que se aumenta a dose do lodo de esgoto, a qual é corroborada pela não significância do teste t aplicado ao coeficiente de determinação da reta (R^2).

FIGURA 2 - Regressão linear entre teores de matéria orgânica do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Esses resultados são decorrentes da dinâmica dos processos de decomposição da matéria orgânica no solo e, ao mesmo tempo das alterações provocadas pelo desenvolvimento das plantas. As parcelas que receberam fertilizantes minerais tiveram, depois de cento e vinte e quatro dias de cultivo, teores de matéria orgânica baixos o suficiente para não serem considerados estatisticamente diferentes daqueles obtidos no tratamento testemunha.

MELO (1994) e SIMONETE (2001), ao contrário, encontraram correlações lineares e positivas fortemente significativas. Porém, os lodos utilizados naqueles trabalhos apresentavam características muito diferentes do material aqui estudado.

pH solo

Os valores médios de pH, do solo ao final do experimento, e respectivas comparações estatísticas pelo teste de Tukey (APÊNDICE 1) indicam nítida tendência de redução a medida que se eleva a dose do lodo de esgoto. Pela análise estatística, apenas a maior dose de lodo proporcionou pH, cujo valor pode ser considerado inferior ao encontrado no tratamento testemunha. Essa tendência não pode ser atribuída exclusivamente ao lodo de esgoto, devendo se considerar também a ocorrência de trocas, por parte das raízes das plantas, de íons H^+ por outros cátions da solução do solo, no processo de absorção pela planta. Quanto ao efeito da matéria orgânica na redução do pH, do solo, há muito tempo mesmo é conhecido, pois inúmeros são os trabalhos que mencionam tal fato. Entretanto, esse efeitos mencionados na literatura são reversíveis, ou seja, inicialmente há o decréscimo do pH, mas as reações se reverterem o que faz com o mesmo aumente em etapa posterior (MYASAWA et al., 2001).

Na Figura 3 verifica-se o efeito acidificante do lodo quando disposto no solo. Nota-se também que a fertilização mineral, embora de forma não significativa tendeu a reduzir o pH do solo em relação ao tratamento testemunha. Vale lembrar, que inicialmente o solo foi corrigido quanto à acidez, empregando-se calcário dolomítico calcinado, e que o pH do lodo de esgoto utilizado era de 6,48, o que permite-nos referir que o seu pH, na forma em que o lodo se encontrava antes da aplicação do solo não se constituía em fator limitante para o crescimento das plantas.

FIGURA 3 - Regressão linear entre teores de pH do solo e doses de lodo de esgoto, além de valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

****** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

SIMONETE (2001), aplicando doses crescentes de lodo de esgoto em solo cultivado com milho obteve o mesmo efeito. Porém, OLIVEIRA (2000), e inúmeros outros autores trabalhando com lodo higienizado com cal virgem obtiveram resultados contrários, como consequência direta da presença da cal, que em alguns casos representa até 50%, em peso, do lodo higienizado.

As parcelas que receberam o lodo de esgoto apresentaram valores de pH do lodo de esgoto variando de 5,15 a 4,03 o que representa uma acidez que pode ser considerada alta, em termos de fertilidade do solo (RAIJ et al., 1996).

P-resina

Os teores de P disponível no solo sofreram alterações significativas com as aplicações de lodo de esgoto, sendo que os maiores aumentos ocorreram nas parcelas que receberam as maiores doses do lodo. Esse efeito positivo do lodo também foi observado por MARQUES (1996), e

SIMONETE (2001). Na Figura 4 observa-se a reta obtida por regressão linear e os teores de P no solo das parcelas que receberam fertilizantes minerais.

FIGURA 4 - Regressão linear entre teores de P – resina do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Além da tendência já mencionada em relação às doses crescentes de lodo, chama nos a atenção os teores encontrados nas parcelas fertilizadas com sais minerais, indicando que o lodo de esgoto especialmente nas maiores doses atuou como fonte de nutrientes de forma mais eficiente do que a fertilização mineral aplicada. Essa superioridade, pode ser decorrente da liberação gradual do elemento no solo, ao mesmo tempo em que transcorre a degradação da matéria orgânica. No caso da fertilização mineral, a maior disponibilidade do P aumentam as possibilidades de ocorrência da imobilização do elemento pelos óxidos de Ferro, Alumínio e Manganês, formas bastante comuns nos solos tropicais.

Cátions trocáveis

Nas Figuras 5 a 7 são apresentadas as retas obtidas por regressão linear para teores de Potássio, Cálcio e Magnésio no solo, em função das doses

de lodo de esgoto, e os teores dos respectivos elementos nas parcelas fertilizadas com sais minerais.

Em relação ao Potássio, pode-se afirmar que o lodo de esgoto comportou-se com potencial de contribuição para aumento da sua disponibilidade do elemento no solo. Ressalta-se que por ocasião da instalação do experimento, o Potássio exigido pela cultura, foi em sua totalidade fornecido na forma de KCl (58% Ca_2O). Assim, os teores encontrados ao final do experimento, os quais apresentam tendência de aumento com as doses de lodo, são consequência da presença do lodo no solo. Em relação à fertilização mineral observa-se na Figura 5 que apenas a maior dose de lodo, foi significativamente superior, ficando as demais nos mesmos níveis dessa.

FIGURA 5 - Regressão linear entre teores de Potássio do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Esses resultados são concordantes com os encontrados por SIMONETE (2001), porém, discordantes de MARQUES (1996), o qual encontrou decréscimos dos teores de Potássio do solo, a medida em que se aumentava a dose do lodo aplicado. Esse autor atribui esse comportamento no Potássio ao excesso de Cálcio, uma vez que o lodo empregado naquele trabalho teria sido higienizado com cal virgem.

Apesar desse bom desempenho do lodo, os teores de Potássio no solo variaram de 0,32 a 0,83 mmol_e dm⁻³, que segundo RAIJ et al. (1996), constituem-se em teores que, em sua maioria para o Estado de São Paulo, são considerados muito baixos.

Cálcio e Magnésio no solo

Em relação ao Cálcio e ao Magnésio o lodo de esgoto não atuou de forma a demonstrar ser fonte potencial desses elementos. Haja visto que os teores encontrados nos solos que receberam a maior dose de lodo foram inferiores aos encontrados nos solos das parcelas correspondentes ao tratamento testemunha. Esses comportamentos decorrem do descompasso que existe entre a capacidade de fornecimento de Cálcio e Magnésio pelo lodo e o efeito marcante da sua matéria orgânica intensificando o desenvolvimento vegetativo das plantas. Nas Figuras 6 e 7 observam-se as retas obtidas por regressão linear entre os teores de Cálcio e Magnésio no solo e as doses de lodo de esgoto, além dos teores desses elementos nos solos fertilizados com sais minerais. Verifica-se ainda que o lodo empregado comportou-se melhor como fonte de Cálcio do que Magnésio, entretanto a relação Cálcio e Magnésio obtido sugerem a necessidade de se proceder à realização da suplementação de magnésio, a qual pode ser realizada empregando-se calcário magnesiano.

FIGURA 6 - Regressão linear entre teores de Cálcio do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

FIGURA 7 - Regressão linear entre teores de Magnésio do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Os teores de Cálcio no solo variaram na faixa de 10,19 a 18,74 mmol_c dm⁻³. Por outro lado, os de magnésio variaram entre 0,23 e 2,25 mmol_c dm⁻³. RAIJ et al. (1996), classificam esses teores como sendo muito altos no caso do Cálcio, e muito baixos no caso do Magnésio.

CTC e Saturação por bases

Como consequência dos teores consideráveis de matéria orgânica no lodo, é de se esperar que a aplicação de doses crescentes desse resíduo resulte em aumento da CTC em decorrência do incremento da matéria orgânica e de frações resultantes da sua decomposição, especialmente daquelas compostos de radicais carboxílicos, que freqüentemente apresentam cargas negativas em suas superfícies, que lhe confere poder de adsorção de cátions. Essas cargas, também denominadas cargas dependentes do pH, são as grandes responsáveis pela fertilidade de solos intemperizados, como são os solos tropicais. Verifica-se que a adição de lodo proporcionou aumento a CTC do solo, independentemente da dose aplicada (APÊNDICE1). Entretanto, os resultados obtidos indicam que o aumento da dose de lodo de L200 para L300 não trouxe contribuição efetiva, levando-nos a crer que a dose L200 permitiu que se atingisse o máximo em termos de CTC, a partir da qual atingiríamos um platô, o que conduziria à estabilidade da referida variável. Na Figura 8, a reta obtida por análise de regressão entre CTC do solo e dose de lodo de esgoto e a CTC encontrada das parcelas que receberam fertilização mineral.

Esses resultados vão ao encontro de todos os trabalhos que abordam o mesmo tema e estão na literatura disponível. Assim, podemos citar alguns dos mais recentes, como MARQUES (1996), MELO e MARQUES (2000), ANDRADE (1999) e SIMONETE (2001).

Em relação à saturação por bases, verifica-se que as maiores doses de lodo proporcionaram decréscimos significativos na referida variável. Os valores encontrados variaram de 55,50 (testemunha) a 24,50 %, valores estes inferiores aos 70% para os quais realizou-se a calagem inicial dos solos.

FIGURA 8 - Regressão linear entre teores de CTC do solo e doses de lodo de esgoto, além de valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

A aplicação da análise de regressão linear dos dados obtidos é apresentada na Figura 9. Observa-se que o aumento da dose de lodo proporcionou decréscimo na saturação por bases. Exceto para a dose L100, as demais doses de lodo resultaram em saturação por bases ao tratamento testemunha e fertilização mineral, indicando, especialmente para as maiores doses de lodo, no caso de se realizar novo cultivo desse solo, ser necessária a prática da calagem. Resultados semelhantes foram obtidos por SIMONETE (2001). Porém, MARQUES (1996), SILVA (1995) e OLIVEIRA (2000), encontraram valores discordantes, uma vez que, nesses trabalhos o aumento da dose de lodo levou ao aumento da V% do solo.

FIGURA 9 - Regressão linear entre teores de valores de saturação por bases do solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Enxofre

A aplicação de lodo de esgoto no solo proporcionou aumentos significativos dos teores no solo em relação ao tratamento testemunha e fertilização mineral (APÊNDICE 1). Entretanto a aplicação da regressão linear entre teores de S e doses de lodo de esgoto não apresentou correlação estatística significativa. As parcelas que receberam lodo apresentaram teores variando de 72,38 mg dm⁻³, (L300) a 164,25 mg dm⁻³ (L200). Nas parcelas correspondentes à testemunha e fertilização mineral os teores encontrados no solo foram de 2,00 mg dm⁻³.

5.2 Micronutrientes e Metais Pesados do Solo

Nas figuras 10 a 16 e na tabela constante do apêndice 2, são apresentados resultados referentes à presença de alguns micronutrientes e metais pesados, nos solos, ao final da condução do experimento, por ocasião da coleta de amostras de solo e plantas.

Boro

Os teores de boro nos solos, que receberam lodo de esgoto ou fertilização mineral, foram superiores aos encontrados nos solos que receberam tratamento testemunha. Entretanto, observa-se equivalência entre os teores do referido elemento nas parcelas com lodo, e aqueles encontrados nas parcelas com fertilizantes minerais, independentemente da dose de lodo, indicando ser o lodo uma fonte potencial do referido elemento no solo. Na Figura 10, observa-se que o aumento da dose de lodo, promove variações lineares e diretas na disponibilidade de boro no solo.

FIGURA 10 - Regressão linear entre teores de Boro no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

Apesar desses acréscimos não serem preocupantes, (encontram-se nos mesmos níveis da fertilização mineral), deve-se ressaltar que esse comportamento decorre de uma única aplicação de lodo, restando-nos a dúvida do que poderia acontecer com inúmeras aplicações sucessivas, ao longo de anos ou de décadas.

Cobre

Os teores de cobre encontrados no solos em que se aplicou lodo de esgoto, variaram de 1,32 a 3,60 mg dm⁻³, sendo diferentes entre si e superiores aos valores encontrados nos solos do tratamento testemunha e fertilização mineral (APÊNDICE 2). Em relação ao tratamento testemunha, o lodo proporcionou aumentos no teor de cobre variando de 100 % (L100) a 500 % (L300). A aplicação da análise de regressão linear, aos resultados obtidos, é apresentada na Figura 11.

FIGURA 11 - Regressão linear entre teores de Cobre no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Observa-se que o lodo de esgoto promove elevação dos níveis de Cobre no solo, de forma linear e positiva, de acordo com a dose aplicada. Esse aumento da disponibilidade do cobre é preocupante apesar da presença de matéria orgânica no lodo. A matéria orgânica, que na maioria dos casos regula a disponibilidade de metais às plantas, caso específico do Cobre atua de forma contrária, pois esse elemento tem sua absorção aumentada quando complexado pela matéria orgânica. Esses resultados são concordantes com os encontrados por ANDRÉ (1994) e SIMONETE (2001), porém, discordante de ANDRADE (1999), que aplicou doses crescentes de lodo de esgoto em solo cultivado com Eucaliptos, sem encontrar correlação entre as doses de lodo e os teores do elemento no solo, após 180 da aplicação. Esse autor salienta que esse comportamento ocorreu na camada 0,30 cm. Na camada 30-60 cm, a referida correlação se estabeleceu, indicando ter ocorrido mobilização do elemento ao longo do perfil do solo, o que poderia viabilizar a contaminação de lençóis freáticos, sendo essa, uma das formas de inserção do elemento na cadeia alimentar.

Ferro

A aplicação de lodo de esgoto elevou os níveis de Ferro no solo quando se compara com a testemunha e a fertilização mineral. Os teores encontrados nas parcelas que receberam lodo variaram de 153 a 209 mg dm^{-3} , representando aumentos na ordem de até 500 % em relação ao tratamento testemunha. Esses valores são expressivos, porém a absorção e a translocação do elemento pelas plantas necessita da ocorrência de fenômenos que promovam a Complexação do elemento, o que pode se constituir num processo de defesa da planta, aos altos teores de Ferro no solo. Na Figura 12 é apresentada a reta obtida por análise de regressão entre doses de lodo e níveis do elemento no solo, indicando que o lodo aumenta os níveis do elemento no solo, em formas disponíveis, muito acima daqueles encontrados nos solos que receberam fertilizantes minerais.

FIGURA 12 - Regressão linear entre teores de Ferro no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

Comportamentos semelhantes para o Ferro diante da aplicação de lodo de esgoto foram encontrados por MARQUES (1996) e SIMONETE (2001). Por outro lado, ANDRÉ (1994) e KROHLING (2000), sendo que este

último trabalhou com doses crescentes de lodo de lagoa, higienizado com cal, não encontraram correlações estatísticas entre doses de lodo e teor de Ferro disponível no solo.

Manganês, Chumbo e Níquel

A aplicação de lodo de esgoto em doses crescentes proporcionou elevação destes elementos no solo, em relação ao tratamento testemunha e fertilização mineral. Para o Manganês, a aplicação da análise de regressão linear mostrou o não estabelecimento de correlação entre os teores do elemento no solo e as doses de lodo. Para o Chumbo e Níquel (Figuras 13 e 14), observa-se que o aumento da dose de lodo resultam em maiores disponibilidades desses elementos no solo. Esses resultados são discordantes dos encontrados por ANDRADE (1999), em relação ao Níquel; porém, concordantes com os obtidos por ANDRÉ (1994), em relação ao Chumbo.

FIGURA 13 - Regressão linear entre teores de Chumbo no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

FIGURA 14 - Regressão linear entre teores de Níquel no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

Cádmio e Crômio

Apesar dos valores excessivamente baixos, mesmo assim foi possível detectar superioridade dos teores desses elementos nos solos que receberam lodo de esgoto, em relação à fertilização mineral e tratamento testemunha. A aplicação da análise de regressão linear, Figuras 15 e 16 permite-nos inferir que o lodo contribuiu de forma efetiva para aumentar os teores desses elementos no solo. Em relação ao Crômio, esses resultados são concordantes com os encontrados por MARQUES (1996).

OLIVEIRA (2000), analisando soluções de solos (Latosolo Vermelho-Amarelo, do Município de Piracicaba-SP) que receberam lodo de esgoto, em doses crescentes (33, 66 e 99 Mg ha⁻¹), à base seca, encontrou teores de Cádmio <0,18 mg L⁻¹, Cr e Ni²⁺ <0,10 mg L⁻¹, Cu²⁺ e Zn²⁺ <0,14⁻¹ e Pb²⁺ <0,76⁻¹ todos abaixo do limite de determinação do método analítico empregado.

FIGURA 15 - Regressão linear entre teores de Cádmio no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

FIGURA 16 - Regressão linear entre teores de Crômio no solo e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Zinco

A incorporação de lodo de esgoto no solo proporcionou elevação da disponibilidade de Zinco no solo a níveis significativamente maiores do que os encontrados nos tratamentos testemunha e fertilização mineral.

Nas parcelas que receberam lodo de esgoto, os teores encontrados variaram de 14,63 a 17,92 mg dm^{-3} . De acordo com MARQUES (2001) os teores de zinco nos solos agrícolas, em média, acham-se em torno de 80 mg dm^{-3} .

A avaliação do potencial do lodo de esgoto como fornecedor de Zinco, em formas disponíveis, para o solo, é apresentada na Figura 17, em que se apresenta a reta obtida por regressão linear entre os teores do elemento no solo e as doses de lodo de esgoto testadas.

Verifica-se que os teores disponíveis de zinco no solo correlacionaram-se de forma positiva e significativa com as doses crescentes de lodo de esgoto incorporadas no solo, permitindo-nos inferir que o lodo de esgoto atuou de forma efetiva para o fornecimento do referido elemento no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por OLIVEIRA (1992), ANDRÉ (1994) e MARQUES (1996).

FIGURA 17 - Regressão linear entre teores de zinco no solo e doses de lodo de esgoto, além de teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

5.3 Crescimento e Produção de Matéria Seca pelas Plantas

Na Figura 18 são apresentadas as variações da altura das plantas, a partir dos dados do APÊNDICE 3.

Observa-se que, de maneira geral, as plantas dos diferentes tratamentos tenderam a ter a sua altura aumentada com o passar do tempo. Da semeadura até os 73º dia, os tratamentos L200 e L300 se destacaram em relação aos demais, sendo que o L300 foi sempre maior. A partir dos 94º dia, além do L200 e L300, também L100 passou a se destacar. O tratamento testemunha e a fertilização mineral foram equivalentes na maior parte das vezes. No 124º, a altura das plantas no tratamento testemunha superou de forma expressiva a fertilização mineral. As parcelas que receberam lodo de esgoto, especialmente a partir do 73º dia apresentaram uma taxa de crescimento maior do que os demais tratamentos.

Em relação ao acúmulo de matéria seca nas diferentes partes das plantas (Figuras 19 a 21 e APÊNDICE 4), observa-se que o tratamento L300 proporcionou produção de matéria seca, superior ao tratamento testemunha; porém, nos mesmos níveis dos demais tratamentos, ou seja, fertilização mineral, L100 e L200. Essas observações se aplicam à produção de matéria seca por folhas mais ramos, panículas e raízes.

A aplicação da análise de regressão linear aos dados de produção de matéria seca em função das doses de lodo, indica que a correlação linear positiva e significativa para folhas mais ramos, panículas e raízes.

FIGURA 18 - Variação da altura de planta de sorgo cultivadas ao longo de 124 dias, de acordo com os tratamentos testados.

FIGURA 19 - Regressão linear entre as quantidades de matéria seca produzida pelas folhas e ramos de plantas de sorgo granífero e doses de lodo de esgoto, além dos valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

FIGURA 20 - Regressão linear entre as quantidades de matéria seca produzida pelas panículas de plantas de sorgo granífero e doses de lodo de esgoto, além dos valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade

FIGURA 21 - Regressão linear entre as quantidades de matéria seca produzida pelas raízes de plantas de sorgo granífero e doses de lodo de esgoto, além dos valores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

Esse incremento de matéria seca proporcionado pelo lodo de esgoto, já era esperado, pois plantas cultivadas em solos acrescidos de matéria orgânica tendem a produzir maior quantidade de biomassa vegetal, como consequência de melhorias implementadas tanto nas propriedades físicas (redução da densidade do solo, aumento da aeração do solo, aumento da capacidade de água disponível, e aumento do estado de agregação das partículas do solo), quanto de propriedades químicas (liberação de nutrientes pelo processo de degradação da matéria orgânica, aumento do pH, redução da acidez potencial, etc.). Essas afirmações encontram suporte nos trabalhos MARCIANO (1999).

5.4 Acúmulo de Macronutrientes nas Plantas

Nos apêndices 5 a 7 são apresentadas as quantidades médias de macronutrientes acumuladas nas diferentes partes das plantas, e respectivas comparações estatísticas entre os diferentes tratamentos testados.

Para o Nitrogênio, observa-se que a aplicação de lodo de esgoto elevou o acúmulo do elemento nas folhas e panículas, a valores

significativamente, superiores à testemunha. Entretanto, esses mesmos valores ficaram aquém daqueles acumulados nas plantas do tratamento FM. Nas raízes, o mesmo efeito se verifica porém, aí, o lodo proporcionou acúmulos maiores do que o encontrado no tratamento FM. As quantidades extraídas por essas diferentes partes das plantas, ocorreram na seguinte ordem decrescente: panículas>folhas e ramos>raízes. A aplicação da análise de regressão linear entre o Nitrogênio acumulado e doses de lodo de esgoto (Figuras 22 a 24), proporcionou a obtenção de retas indicando a existência da referida correlação, de forma positiva. Exceto para folhas mais ramos, o acúmulo do elemento no tratamento L300 foi superior ao encontrado no tratamento FM, indicando que o lodo pode atuar como fornecedor do referido alimento às plantas, dependendo da dose em que o mesmo é aplicado.

FIGURA 22 - Regressão linear entre teores de Nitrogênio em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

FIGURA 23 - Regressão linear entre teores de Nitrogênio em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 24 - Regressão linear entre teores de Nitrogênio em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

Vale lembrar que a dose L100 foi definida partindo-se da premissa de que apenas 1/3 do nitrogênio tornar-se-ia disponível às plantas. O que se observa é que especialmente no caso das panículas, essa disponibilidade não se confirma, pois apenas o tratamento L300 ocorre em níveis comparáveis à fertilização mineral. Em se tratando da parte aérea, o acúmulo de nitrogênio, mesmo na maior dose de lodo, foi muito inferior a aquele encontrado no tratamento FM. Isso pode ser explicado pela ocorrência

do fenômeno conhecido como “absorção de luxo”, que teria ocorrido nas parcelas fertilizadas com sais minerais, em que as disponibilidades dos elementos são elevadas.

Fósforo

Em relação ao acúmulo de Fósforo nas plantas, as panículas foram as partes em que o lodo de esgoto mostrou-se eficiente como fonte do referido elemento, sendo que o tratamento L300 proporcionou acúmulos nos mesmos níveis daqueles obtidos nas parcelas que receberam fertilização mineral.

Nas folhas mais ramos, as parcelas que receberam lodo de esgoto proporcionaram acúmulo de P, nos mesmos níveis do tratamento testemunha, (L100 e L200). No entanto, o acúmulo observado na maior dose de lodo foi significativamente inferior ao observado no tratamento testemunha. No caso das raízes, o tratamento L300, embora tenha proporcionado um acúmulo maior do os observados nas doses L100 e L200 também foi inferior ao obtido nas parcelas dos tratamentos testemunha, indicando que para essas partes das plantas, o lodo de esgoto não se comportou como uma boa fonte do elemento. Na literatura existem algumas contradições no que se refere à atuação do lodo de esgoto como fonte de Fósforo. Entretanto, a maioria dos trabalhos mencionam que o referido material tem atuado de forma positiva quando se considera a sua disposição no solo como fonte de Fósforo, em formas disponíveis para as plantas. SABEY(1974), (DEFELIPO) et al (1991), MARQUES (1996), SIMONETE (2001).

As quantidades acumuladas nas parcelas que receberam lodo de esgoto variaram de 0,02 a 0,05 g vaso⁻¹ (folhas mais ramos), de 0,14 a 0,17 g vaso⁻¹, (panículas), 0,02 a 0,04 g vaso⁻¹(raízes).

A aplicação da análise de regressão linear aos dados de P acumulados nas diferentes partes das plantas resultou nos gráficos apresentados nas Figuras 25, 26 e 27.

FIGURA 25 - Regressão linear entre teores de Fósforo em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

FIGURA 26 - Regressão linear entre teores de Fósforo em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 27 - Regressão linear entre teores de Fósforo em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

As quantidades acumuladas nas plantas variaram conforme a parte considerada. Assim, os valores encontrados podem ser citados na seguinte ordem decrescente: panícula>folhas mais ramos>raízes. As retas obtidas para panículas e raízes indicam a existência de correlações lineares positivas. Contudo, para ramos e folhas, o aumento da dose de lodo proporcionou redução das quantidades de P acumulado. Esse decréscimo, pode ser resultado da translocação do elemento das folhas em direção aos grãos, o que teria diminuído as quantidades dessas partes, ao mesmo tempo em que teria aumentado as quantidades acumuladas nas panículas. Em comparação às quantidades acumuladas na parte aérea das plantas fertilizadas com sais minerais, observa-se que a utilização de fertilizantes minerais promoveu acúmulo do elemento em quantidades significativamente inferiores.

Potássio

Quanto ao Potássio acumulado pelas plantas, em suas diferentes partes, apesar de ter se procedido à adubação potássica com KCl, verifica-se que o lodo de esgoto contribuiu de certa forma para o aumento do acúmulo do elemento nas plantas, especialmente nas folhas e ramos e nas panículas.

Assim, as maiores doses de lodo de esgoto proporcionaram acúmulos do elemento superiores aos obtidos quando se empregou fertilização mineral, independentemente da parte considerada. A aplicação da análise de regressão linear entre o Potássio acumulado na dose de lodo de esgoto é apresentada nas Figuras 28 a 30.

FIGURA 28 - Regressão linear entre teores de Potássio em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 29 - Regressão linear entre teores de Potássio em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

FIGURA 30 - Regressão linear entre teores de Potássio em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Nas três partes das plantas estudadas, é possível se verificar tendência do lodo em promover aumento no acúmulo desse elemento, principalmente quando se aplica a dose L300. Entretanto, as correlações estabelecidas são fracas, a ponto de não permitir a afirmação de que o material utilizado atuou eficientemente como fonte de Potássio. Essa afirmação vai ao encontro, se não da totalidade, da maioria absoluta dos trabalhos encontrados na literatura.

Cálcio

No que se refere ao acúmulo de Cálcio nas diferentes partes das plantas, apesar de terem sido detectadas diferenças significativas entre os tratamentos testados, somente pode se afirmar que o lodo de esgoto atuou eficientemente no acúmulo do elemento, quando se considera os resultados obtidos nas raízes.

A aplicação da análise de regressão linear entre os resultados obtidos e as doses de lodo de esgoto, indicou que apenas os valores

encontrados para raízes correlacionaram de forma linear, positiva e significativa, com as doses de lodo de esgoto (Figura 31).

FIGURA 31 - Regressão linear entre teores de Cálcio em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Magnésio

Com relação ao acúmulo de Magnésio nas plantas, apesar da ocorrência de diferenças significativas entre tratamentos, para as quantidades acumuladas em folhas e ramos, a aplicação da análise de regressão linear indica a não ocorrência de correlação linear entre os valores acumulados e as doses de lodo de esgoto. No caso das raízes, conforme pode se observar no APÊNDICE 7 os tratamentos empregados, não exerceram qualquer efeito sobre o acúmulo de Magnésio nessas partes. Não houve diferença entre as parcelas que receberam lodo, e aquelas do tratamento testemunha, ou fertilização mineral. O acúmulo desse elemento nas panículas permite-nos inferir que há evidências de que o acúmulo desse elemento nas parcelas que receberam lodo de esgoto, são comparáveis àquelas obtidas na fertilização mineral, e superiores ao tratamento testemunha.

Na Figura 32, é apresentada a reta obtida pela análise de regressão linear entre as quantidades de Magnésio acumuladas nas panículas, e as doses de lodo de esgoto. Verifica-se efetiva contribuição do lodo de esgoto para o acúmulo de Magnésio nessas partes das plantas.

FIGURA 32 - Regressão linear entre teores de Magnésio em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

Enxofre

Nos solos cultivados, além dos fertilizantes minerais, a matéria orgânica constitui-se na principal fonte do referido elemento no solo, sendo necessária para a transformação do enxofre orgânico em Sulfato, da atividade da enzima arilsulfatase. Dessa forma, os resultados obtidos sobre os acúmulos de enxofre nas plantas de sorgo, em qualquer uma das três partes estudadas, evidencia que o lodo de esgoto contribui de forma expressiva para a disponibilidade do elemento no solo e acúmulo nas plantas, independentemente da parte considerada. Essas afirmações respaldam-se nos resultados das análises de regressão linear, realizadas entre as quantidades acumuladas nas plantas e as doses de lodo de esgoto, apresentadas nas Figuras 33 a 35.

FIGURA 33 - Regressão linear entre teores de Enxofre em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 34 - Regressão linear entre teores de Enxofre em panícula e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

FIGURA 35 - Regressão linear entre teores de Enxofre em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se, em maior grau de intensidade para panículas e raízes que o aumento da dose de lodo resultou em acréscimos lineares nas quantidades de enxofre acumuladas nas plantas. No caso das folhas e ramos, a correlação linear não foi tão forte, porém os acúmulos de enxofre nas plantas, quando se aplicou o lodo de esgoto, foi muito maior do que o acúmulo observado no tratamento testemunha.

5.5 Acúmulo de Micronutrientes e Metais Pesados nas Plantas

Cádmio

O acúmulo, de alguns micronutrientes e metais pesados, nas diferentes partes das plantas de sorgo tem seus resultados apresentados nos APÊNDICES 8 a 10, e Figuras de 36 a 45. Cádmio, Crômio e Chumbo. Os valores encontrados para o acúmulo desses elementos, nas diferentes partes das plantas ficaram aquém dos limites de detecção da metodologia empregada. Esses resultados encontram uma possível explicação no trabalho de LAKE (1987), o qual salienta ser comum a não detecção de metais pesados em

cereais cultivados em solos que receberam lodos do esgoto contendo significativas quantidades de metais pesados. Nesse particular, o autor considera que as pastagens, normalmente acumulam maior quantidade de metais pesados do que cereais. Por outro lado, esses resultados são discordantes daqueles encontrados por CHUMBLEY e UNWIN (1982) e DOWDY e LARSON (1975), os quais cultivaram milho em solos que receberam lodo de esgoto contendo Cádmio, encontrando aumentos significativos nas concentrações do elemento nos tecidos vegetais. KIRKHAM (1975), verificou que o chumbo não foi encontrado na parte aérea de plantas de milho cultivadas em solo acrescido de lodo de esgoto contendo o elemento, mas, nas raízes, a concentração desse elemento aumentou em cinco vezes, quando comparada às testemunha. CARY e KUBOTA (1990) afirmam que o crômio pode ocorrer no solo, em sua forma oxidada (Cr^{+6}), e, quando da presença de matéria orgânica, esta pode reduzir o elemento na forma de (Cr^{+3}). Mencionam ainda que o elemento em sua forma oxidada tem a sua absorção, pelas plantas, favorecida, pelo fato de a mesma ser móvel no solo. Já a forma reduzida, acha-se imobilizada, dificultando a sua absorção. Apesar de alguns autores mencionarem a possibilidade de que a não oxidação do Cr^{+3} , para Cr^{+6} , acredita-se que nesse trabalho, esse elemento deva ter se mantido mobilizado no solo, explicando assim a não detecção da sua presença nos tecidos vegetais.

Cobre

O acúmulo de Cobre nas diferentes partes das plantas de sorgo, quando se empregou lodo de esgoto, de forma geral, foi superior ao obtido nos tratamentos testemunha e fertilização mineral. A análise de regressão linear entre os totais acumulados nas diferentes partes das plantas e doses de lodo de esgoto, são apresentados nas Figuras 36 e 37. Observa-se que o lodo de esgoto foi efetivo no fornecimento do referido elemento, independentemente da parte considerada.

FIGURA 36 - Regressão linear entre teores do Cobre em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 37 - Regressão linear entre teores do Cobre em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Os valores acumulados nas folhas e ramos das plantas cultivadas com lodo, variaram de 0,38 a 1,61 mg vaso⁻¹, o que representam teores variando de 6,23 mg Kg⁻¹ a 28,77 mg Kg⁻¹. De acordo com LAKE (1987), os teores de Cobre, nos tecidos vegetais, capazes de proporcionar o aparecimento de sintomas fitotóxicos, são da ordem de 20 mg kg⁻¹. No presente trabalho não foram verificados sintomas de toxidez, muito embora o lodo de esgoto, na dose L100 tenha proporcionado teores acima dos limites mencionados.

Considerando os resultados obtidos nos tratamentos L200 e L300, fica difícil aceitar os valores encontrados no tratamento L100, o que leva-nos a crer, que esse resultado é a expressão de algum erro experimental ocorrido. O tratamento L300 proporcionou teores de Cobre nas folhas e ramos, da ordem de $11,36 \text{ mg Kg}^{-1}$, o qual situa-se bem abaixo dos limites de toxicidade mencionados.

As maiores doses de lodo proporcionaram nas panículas, de $8,3 \text{ mg kg}^{-1}$, e nas raízes, de $25,93 \text{ mg kg}^{-1}$, indicando que houve absorção do elemento. Porém, mecanismos de resistência e ou tolerância ao elemento devem ter sido acionados, fazendo com que o mesmo ficasse, em sua maioria, restrito às raízes. Essas possibilidades são mencionadas por BARCELÓ e POSCHENRIEDER (1992).

Ferro

O acúmulo de Ferro nas plantas cultivadas em solo acrescido de lodo de esgoto, para folhas e ramos, foi maior do que o ocorrido nas plantas das parcelas fertilizadas com sais minerais. Nas raízes e panículas, apenas o tratamento L300 proporcionou acúmulo de Ferro maior do que o ocorrido nas plantas das parcelas fertilizadas com sais minerais. Em relação ao tratamento testemunha, a incorporação de lodo de esgoto, independentemente da dose, proporcionou valores superiores. Observa-se que o acúmulo do elemento nas diferentes partes das plantas ocorreu na seguinte ordem decrescente: raízes>folhas mais ramos>panículas. O Ferro é um elemento essencial ao desenvolvimento das plantas. O mesmo é exigido em pequenas quantidades, e por isso integra o grupo dos elementos denominados micronutrientes. Normalmente não são encontrados casos de toxidez por ferro. A absorção do elemento pelas plantas ocorre na forma de Fe^{+2} , e Fe^{+3} . Entretanto, a translocação do elemento das raízes para as folhas depende da eficiência da planta em reduzir o Fe^{+3} , para Fe^{+2} , e a ativação de sistemas que promovam a

formação de quelatos, que são as formas predominantes nas quais o elemento é translocado para as diversas partes da planta. No presente trabalho não foram identificados sintomas de toxidez por Ferro.

A avaliação do potencial do lodo em fornecer o referido elemento, acumulando-o nas diversas partes das plantas pode ser observado nas Figuras: 38 a 40.

FIGURA 38 - Regressão linear entre teores do Ferro em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

FIGURA 39 - Regressão linear entre teores do Ferro em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 40 - Regressão linear entre teores do Ferro em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

Verifica-se que o lodo de esgoto apresenta capacidade de proporcionar aumento dos totais de ferro acumulado nas diferentes partes das plantas. Há diferenciação no acúmulo de Ferro nas diferentes partes, as quais podem ser mencionadas na seguinte ordem decrescente: raízes>ramos e folhas>panículas. Os resultados obtidos em relação ao potencial do lodo como fonte de Ferro para as plantas vai ao encontro dos resultados obtidos por OLIVEIRA (1992), ANDRÉ (1994), MARQUES (1996) e SIMONETE (2001).

Manganês

De forma geral, pode-se afirmar que a aplicação de lodo de esgoto proporcionou maior acúmulo de Manganês nos tecidos das plantas de sorgo, quando comparados com os valores encontrados no tratamento testemunha e fertilização mineral.

O tratamento L300 proporcionou teores de Manganês da ordem de 226,14 mg kg⁻¹ (folhas mais ramos), 134,99 mg kg⁻¹ (raízes) e 60,38 mg kg⁻¹ (panículas), os quais são insuficientes para provocar o

aparecimento de fitotoxicidade, pois de acordo com MELO et al. (1997), sintomas de toxidez por Manganês aparecem nas plantas, quando os teores encontram-se na faixa de 1500 a 3000 mg kg⁻¹, nos tecidos vegetais. A avaliação do lodo como fonte de potencial de manganês é realizada através das análises de regressão linear apresentadas nas Figuras 41 a 43.

FIGURA 41 - Regressão linear entre teores do Manganês em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

FIGURA 42 - Regressão linear entre teores do Manganês em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

FIGURA 43 - Regressão linear entre teores do Manganês em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo

Observa-se que o lodo de esgoto contribuiu de forma efetiva, para o aumento do acúmulo de manganês nas folhas e ramos, panículas e raízes. Os acúmulos se deram de forma diferenciada, na seguinte ordem decrescente: parte aérea > panículas $\cong$ raízes.

Zinco

O acúmulo de Zinco nas diferentes partes das plantas de sorgo cultivadas em solo acrescido de lodo de esgoto, foi maior que o ocorrido nas plantas do tratamento testemunha e fertilização mineral (folhas mais ramos e raízes). No caso das panículas, o acúmulo de Zinco nas plantas cultivadas com lodo foi maior do que o ocorrido nas plantas do tratamento testemunha, porém, semelhantes aos encontrados no tratamento fertilização mineral.

Os teores de Zinco encontrados nas plantas cultivadas no tratamento L300 foram de 213,68; 295,56 e 30,91 mg kg⁻¹, para , respectivamente, folhas e ramos, raízes e panículas. Os teores mencionados por MELO et al. (1997), como sendo responsáveis pelo surgimento de

sintomas de toxicidade por Zinco, situam-se entre 70 e 400 mg kg⁻¹, nos tecidos vegetais em geral.

A avaliação do potencial de lodo de esgoto em fornecer Zinco para as plantas é feita através das análises de regressão linear apresentadas nas Figuras 44, 45 e 46.

FIGURA 44 - Regressão linear entre teores do Zinco em folhas e ramos e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

FIGURA 45 - Regressão linear entre teores do Zinco em panículas e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

FIGURA 46 - Regressão linear entre teores do Zinco em raízes e doses de lodo de esgoto, além dos teores encontrados nas parcelas que receberam fertilização mineral.

NS - não significativo.

Verifica-se que o lodo de esgoto contribuiu de forma expressiva de forma para o acúmulo de Zinco nas plantas. Os acúmulos observados nas raízes, folhas e ramos e panículas correlacionaram de forma linear, direta e significativa com as doses de lodo de esgoto. Entretanto, não foram observados, nas plantas, sintomas de toxidez provocados por Zinco.

6. CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos no presente trabalho, foi possível elaborar as seguintes conclusões:

- A incorporação do lodo de esgoto no solo proporcionou melhorias de algumas variáveis consideradas na avaliação da fertilidade do solo, podendo-se citar: teor de Matéria Orgânica, teor de Fósforo disponível, Potássio disponível e capacidade de troca de cátions;
- Por outro lado, algumas variáveis, também relacionadas à fertilidade do solo, sofreram prejuízos, podendo-se citar: pH, teores de Cálcio disponível, Magnésio disponível e saturação por bases;
- Todos os elementos metálicos pesados, presentes no lodo de esgoto tiveram suas disponibilidades aumentadas no solo;
- O lodo de esgoto promoveu maior produção de biomassa vegetal de ramos e folhas, panículas e raízes;
- O aumento da dose de lodo proporcionou decréscimo no acúmulo de P nas folhas e ramos das plantas de sorgo grânifero. Porém, nas outras partes analisadas houve aumento do acúmulo de P. Os totais acumulados de Ca e Mg não foram influenciados pelas doses de lodo de esgoto. Para os demais macronutrientes, o aumento da dose de lodo de esgoto resultou em maior acúmulo nas plantas;
- Todos os metais pesados presentes no lodo de esgoto tiveram seus acúmulos aumentados nas diferentes partes das plantas de sorgo grânifero, com o aumento das doses de lodo incorporadas nos solos. Entretanto, nenhum teor encontrado foi alto o suficiente para proporcionar o surgimento de sintomas de toxicidade nas plantas;
- O lodo de esgoto apresentou bom desempenho como fonte de micronutrientes para as plantas de sorgo grânifero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.O. A. C. (1991). **Official methods of analysis of association of official analytical chemists**. 11.ed. Washington, p. 1075.
- ANDRADE, C.A. (1999). **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de Eucalyptus grands após aplicação de biossólido da ETE de Barueri**. Piracicaba. 65 p. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- ANDRÉ, E.M. (1994). **Atividade biológica do solo e disponibilidade de nutrientes e metais pesados para a cultura do sorgo granífero em solo acrescido de lodo de esgoto**. Jaboticabal. 123 p. Tese (graduação).
- ANDREOLI, C.L. (1997). **Proposição de plano de monitoramento da reciclagem do lodo de esgoto no Estado do Paraná**. 19º Congresso Brasileiro de Eng^a Sanitária – ABES, Fóz do Iguaçu – PR., setembro.
- ARCEIVALA, S.J. (1981). **Wastewater Treatment and Disposal**. Engineering and Ecology in Pollution Control. New York, Marcel Dekker. p. 892.
- BARCELÓ, J.; POSCHINREDER, ch. (1992). **Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados**. Suelo y planta, v.2, p. 345- 361.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P.C.T. (1982). **Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizante organomineral IPT na cultura do milho**. Fertilizantes, São Paulo – SP, v. 4, n. 1, p. 14-5.
- CARVALHO, P.C.T. (1982). **Utilização do lodo de esgoto na agricultura**. In: **Colóquio Regional sobre Matéria Orgânica do Solo**, Rio de Janeiro – RJ. P. 223-6.
- CARY, E.E.; KUBOTA, J. (1990). **Chromium concentration in plants: effects of soil chromium concentration and tissue contamination by soil**. **Journal Agricultural food Chemistry**, v. 38, p.108-114.

- CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Aplicação de lodos de sistema de tratamento biológico em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação**. P 4.230. 32 p (Manual Técnico).
- CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. (1989). **Manual sobre operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas**.
- CHUMBLEY, C.G. and UNWIN, R.J. (1982). Cadmium and lead content of vegetable crops grown on land with history of sewage sludge application, **Environ. Pollut.** (Ser.B),4.231.
- CIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP - (2001). Unidade de Negócio do Baixo Tietê e Grande. Departamento Técnico e Operacional. **Relatório Técnico**.
- CIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP (1999) - **Jornal ligação**, a. II, n. 8, março / maio.
- CUNNINGHAM, J.D.; RYAN, J.A.; KEENEY, D.R. (1975). Phytotoxicity in and metal uptake from soil treated with metal-amended sewage sludge. **J. Environ. Qual.**, Madison, v. 4, p. 455-60.
- CUNNINGHAM, J.O.; RYAN, H.A.; and KEENEY, D.R. (1975). Phytotoxicity and metal uptake from soil treated with metal amended sewage sludge. **Journal environmental quality**, v.4, p.455.
- DA-RIN, B.P.; NASCIMENTO, G.P.L. (1988). Acumulação de Lodo em Lagoas de Estabilização. **XXI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro.
- DEFELIPO, B.V.; NOGUEIRA, A.V.; LOURES, E.V.G.; ALVAREZ, V.H. (1991). Eficiência agrônômica de lodo de esgoto proveniente de uma indústria siderúrgica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.389-393.
- DOWDY, R.H. and LARSON, W.E. (1975). The availability of sludge-borne metals to various vegetable crops, **J. Environqual.**, 4, 229.
- GALLOWAY, H.M.; JACOBS, L.W. (1977). **Sewage Sludge**. 1- Characteristics and management. Utilization municipal sewage was and sludges on land for agricultural production. Washington: North Central Regional Extension Publication, p. 3-17.
- GONÇALVES, R.F. (2000). Gerenciamento de lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas. PROSAB – ABES. Rio de Janeiro.

- HATORI, H; MUKAI, S. (1996). Decomposition of sewage sludges in soil as affected by their organic matter composition. **Soil Sci. Plant Nutr.**, Bunkejo-Ku, v. 32, n. 3, p. 421-32.
- IAC - Instituto Agronômico de Campinas. (1994). **Micronutrientes em Solos: Métodos Químicos de Análise de Solo e Planta.**
- KIEHL, E.J. (1985). **Fertilizantes orgânicos.** Editora Agronômica Ceres Ltda; São Paulo-SP.
- KIRKHAN, M.B. (1975). Trace elements in corn grow on a long-term sludge disposal site. **Environ. Sci. Technol.**, 9, 765.
- KROHLING, B. (2000). Utilização de lodo de lagoa anaeróbia higienizado com cal, suplementado com doses de cloreto de potássio, na formação de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) Vitória. 95 p. Universidade Federal do Espírito Santo.
- LAKE, D.L. (1987). Sludge disposal to land. P. 91-130. In: LESTER, J.N. (ed) **Heavy metals in Wastewater and sludge treatment process.** V.2, 155 p., CRC press, Boca Raton.
- LOON, J.C.V. (1985). **Select methods of trace metal analysis.** John Wiley & Sons, p. 289- 291.
- MAGDOF, F.R.; AMADON, J.F. (1980). Nitrogen availability from sewage sludge. **J. Environ. Qual.**, Madison, v. 9, p. 451-5.
- MALAVOLTA, E. et al. (1997). **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas.** Associação Brasileira para Pesquisa da Potássio e do Fósforo. Piracicaba.
- MARCIANO, C.R. (1999). **Incorporação de resíduos urbanos e as propriedades físico- hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo.** Piracicaba-SP. 93p. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz.
- MARQUES, M.O. (1996). **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar.** Jaboticabal-SP, 111p. Tese (livre docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP.
- MARQUES, M.O. (2001). **Metais pesados e o uso de biossólidos na agricultura** (comunicação oral).
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O. (2000). O potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. p.109-141. In: BETTIOL, W.;

- CAMARGO, D.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Embrapa- Meio Ambiente, 2000. 312 p.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R.A.; LEITE S.A.S. (1994). Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações de matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana de açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 18, p.449-455.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E. (1997). Uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais. In: **XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, Rio de Janeiro, SBCS. CD ROOM.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FANCHINI, I.C. (2001). **Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais**. **Informações agronômicas**, n.2, p. 1-8. (Encarte técnico).
- NASCIMENTO et al. (1999). Avaliação comparativa do Modelo de Saqqar e Pescod com as Taxas de Acumulação de Lodo em Lagoas de Estabilização no Espírito Santo. **20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental da ABES**, Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, F.C. (2000). **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo, cultivado com cana de açúcar**. Piracicaba, 247 p. Tese (doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- OLIVEIRA, F.C. (1992). **Efeito da aplicação de lodo de esgoto em Latossolo Vermelho-Escuro, textura média e em sorgo granífero**. Jaboticabal. 99 p. Tese (graduação) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.
- PAING, J. et. al. (1999). **Sludge accumulation and methanogenic activity in anaerobic lagoon**, 4th Internacional Specialiste Conference on Waste Stabilisation Ponds. Tecnology and the Environment, Marrakesh.
- RAIJ, B.V. et al. (1987). **Análise Química do Solo para fins de Fertilidade**. Instituto Agrônomo, CPA, AS-SP. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP Jaboticabal.
- RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C. (eds). (1996). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2º ed. Campinas, Instituto Agrônomo e Fundação IAC. 285 p. (Boletim técnico, 100).

- RAIJ, B.V. et al. (1985). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Instituto Agrônomo. Campinas – SP. (Boletim 200).
- SABEY, B.R. (1974). The use of sewage sludge as a fertilizer. **Environ. Eng.**, London, p. 72-108.
- SAQQAR, M.M.; PESCOD, M.B. (1995). Modelling sludge accumulation in anaerobic wastewater stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 185-190.
- SHINEITER, R.W. et al. (1993). Sludges from cold regions lagoons. **Water Environment Research**, vol.65, Nº 2, pp 146-155, March-April.
- SILVA, F.C. (1995). **Uso agrônômico de lodo de esgoto: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana de açúcar**. Piracicaba. 170 p. Tese (doutorado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- SILVA, M.O.S.A. (1983). **Sedimentação de Lodo em Lagoas de estabilização**. 12º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Santa Catarina.
- SILVA, S.A. (1982). **On the treatment of domestic sewage in stabilization ponds in Northeast Brazil**, PhD Thesis, Engeneering and Aplied Science, Univiersity of Dundee, U.K.
- SIMONETE, M.A. (2001). **Alterações nas propriedades químicas de um argissolo adubado com lodo de esgoto e desenvolvimento e acúmulo de nutrientes em plantas de milho**. Piracicaba, 89 p. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- SPERLING, M.V. (1996). **Lagos de Estabilização**. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Embiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Princípios do Tratamento Biológico de Aguas Residuárias, v. 3, 134 p.
- VANZOLINI, S. (1994). **Incorporação de Calcário lodo de esgoto e vinhaça na cultura de sorgo granífero, em areia quartizosa em condições de casa de vegetação**. Jaboticabal, 85p. Tese (graduação) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.
- WILSON, G.B. et al. (1980). **Manual for compositing sewage sludge by the beltville acrated-Pile method**, Ohio: Laboratory Office of Research and Development, p. 65.

APÊNDICE 1 - Propriedades químicas do solo, para fins de fertilidade, em função dos tratamentos testados e comparações estatísticas, ao final dos experimentos.

Tratamentos	M.O	pH	P	K	Ca	Mg	C.T.C	V %	S
	g dm ⁻³	Ca Cl ₂	mg dm ⁻³	m mol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³
Testemunha	13,25 AB	5,90 A	14,75 D	0,33 BC	15,67 AB	2,25 A	33,10 B	55,50 A	2,00 D
F. Mineral	11,70 B	5,32 AB	30,68 C	0,35 BC	18,74 A	1,47 AB	35,61 B	53,82 A	1,99 D
Lodo 100	17,70 A	5,15 AB	31,14 C	0,32 C	15,99 AB	1,15 B	47,51 A	58,32 A	120,99 B
Lodo 200	18,00 A	4,90 AB	58,41 A	0,43 B	13,47 B	1,20 B	50,88 A	33,13 B	164,25 A
Lodo 300	18,00 A	4,03 B	42,38 B	0,83 A	10,19 C	0,93 B	48,65 A	24,50 B	72,38 C
Estatística									
DMS (Tukey 5%)	4,89	1,44	4,65	0,13	3,14	1,02	8,37	16,46	8,14
F (Blocos)	1,32 NS	1,90 NS	3,33 NS	6,33 **	2,86 NS	1,63 NS	0,70 NS	0,71 NS	2,60 NS
F (Tratamentos)	7,78 **	4,60 *	246,31 **	89,43 **	21,01 **	5,13 *	19,37 **	17,39 **	1590,15**
C.V. (%)	13,79	12,63	5,81	10,18	9,40	32,38	8,60	16,20	4,99

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = Significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 2 - Teores de micronutrientes e metais pesados no solo (mg dm⁻³), em função dos tratamentos testados e comparações estatísticas, ao final dos experimentos.

Tratamentos	B	Cu	Fe	Mn	Cd	Pb	Ni	Cr	Zn
Testemunha	0,20 B	0,65 D	33,94 E	1,35 D	0,01 D	0,45 C	0,04 D	n.d	2,75 B
F. Mineral	0,38 A	0,75 D	67,62 D	3,07 D	0,01 D	0,38 D	0,05 D	n.d	4,463 B
Lodo 100	0,43 A	1,32 C	167,93 B	193,07 B	0,02 C	0,93 A	0,41 B	0,05 AB	14,63 A
Lodo 200	0,38 A	2,50 B	153,38 C	14,08 C	0,03 B	0,84 B	0,34 C	0,10 A	6,82 A
Lodo 300	0,43 A	3,60 A	208,63 A	21,45 A	0,05 A	0,97 A	0,53 A	0,10 A	17,92 A
Estatística									
DMS (Tukey 5%)	0,15	0,47	6,30	2,02	0,01	0,06	0,04	0,06	10,05
F (Blocos)	3,77 *	1,21 NS	1,20 NS	3,97 *	1,12 NS	4,96 *	1,92 NS	1,00 NS	1,05 NS
F (Tratamentos)	6,85 **	145,31 **	2721,12 **	418,42 **	28,81 **	408,56 **	746,05 **	15,00 **	8,81 **
C.V. (%)	19,22	11,87	2,21	7,60	24,94	3,89	5,99	51,64	42,71

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** =Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Dias após a semeadura

APÊNDICE 3 - Altura das plantas de sorgo granífero (m), no decorrer do tempo, a partir da semeadura, em função dos tratamentos testados.

Tratamento	Dias após a semeadura							
	0	43	61	68	73	94	101	124
Testemunha	0	0,5	0,5	0,63	0,58	0,67	0,7	1,38
	0	0,55	0,55	0,63	0,68	0,7	0,89	1,32
	0	0,5	0,5	0,75	0,75	0,81	0,87	1,34
	0	0,58	0,58	0,73	0,78	0,84	1	1,47
FM	0	0,63	0,63	0,89	0,85	1	1,1	1,44
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,5	0,5	0,84	0,9	1,15	1,3	1,43
	0	0,59	0,59	0,88	1	1,14	1,2	1,45
L100	0	0,52	0,52	0,9	1	1,24	1,3	1,68
	0	0	0	0	0	0,83	1,14	1,24
	0	0,61	0,61	0,81	1	1,2	1,2	1,26
	0	0,74	0,74	0,8	1	1,34	1,38	1,61
L200	0	0,72	0,72	0,92	1,1	1,07	1,31	1,56
	0	0,66	0,66	0,9	1,1	1,1	1,3	1,55
	0	0,65	0,65	0,7	1	1,18	1,35	1,38
	0	0,46	0,46	0,92	1,05	1,25	1,34	1,4
L300	0	0,7	0,7	1	1,25	1,12	1,41	1,7
	0	0,68	0,68	0,93	1,08	1,2	1,53	1,77
	0	0,73	0,73	0,89	1,1	1,1	1,38	1,6
	0	0,73	0,73	0,98	1,02	1,2	1,1	1,28

APÊNDICE 4 - Produção de matéria seca, de folhas e ramos, panículas e raízes de sorgo granífero (g vaso⁻¹), em função dos tratamentos e comparações estatísticas.

TRATAMENTOS	FOLHAS + RAMOS	PANÍCULAS	RAÍZES
T	33,40B	18,61C	9,68B
FM	81,29A	57,64AB	22,80AB
L100	55,95AB	40,42BC	16,16AB
L200	60,92A	39,0BC	15,19AB
L300	74,82A	69,89A	28,15A
DMS (Tukey 5%)	2,15	24,81	13,61
F (Blocos)	2,36 NS	1,98 NS	0,88 NS
F (Tratamentos)	10,34 **	12,60 **	5,64 **
C.V. (%)	18,92	24,32	32,83

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 5 - Quantidades totais de nutrientes (g vaso⁻¹), acumulados em folhas e ramos de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos e comparações estatísticas.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
Testemunha	0,10 E	0,05 B	0,22 C	0,18 D	0,14 A	0,02 B
F. Mineral	0,63 A	0,13 A	0,75 B	0,40 B	0,09 B	0,03 B
Lodo 100	0,28 C	0,05 BC	0,24 C	0,43 AB	0,09 B	0,25 A
Lodo 200	0,22 D	0,03 BC	0,26 C	0,46 A	0,06 C	0,25 A
Lodo 300	0,31 B	0,02 C	1,08 A	0,32 C	0,11 B	0,19 A
Estatística						
DMS (Tukey 5%)	0,02	0,03	0,09	0,05	0,03	0,11
F (Blocos)	9,30 **	0,34 NS	2,32 NS	5,03 *	1,02 NS	1,44 NS
F (Tratamentos)	1883,72 **	37,44 **	382,33 **	110,10 **	15,56 **	24,70 **
C.V. (%)	2,94	23,55	7,75	6,01	14,18	31,82

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade;
 ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 6 - Quantidades totais de nutrientes acumulados em panículas de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (g vaso^{-1}) e comparações estatísticas.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
Testemunha	0,12 E	0,03 C	0,05 D	0,01 C	0,02 D	0,02 D
F. Mineral	0,75 B	0,15 AB	0,25 B	0,05 B	0,09 AB	0,04 C
Lodo 100	0,56 C	0,14 B	0,26 B	0,07 B	0,08 BC	0,05 B
Lodo 200	0,43 D	0,14 B	0,17 C	0,12 A	0,07 C	0,08 A
Lodo 300	0,80 A	0,17 A	0,33 A	0,06 B	0,10 A	0,07 A
Estatística						
DMS (Tukey 5%)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02
F (Blocos)	1,76 NS	0,56 NS	0,26 NS	0,43 NS	4,29 *	8,31 **
F (Tratamentos)	3055,17 **	198,18 **	291,57 **	30,94 **	116,71 **	63,46 **
C.V. (%)	1,87	6,00	5,90	23,83	8,35	13,17

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade;
 ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 7 - Quantidades totais de nutrientes acumulados em raízes de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (g vaso⁻¹) e comparações estatísticas.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
Testemunha	0,03 C	0,18 A	0,03 C	0,02 D	0,01 A	0,01 D
F. Mineral	0,08 B	0,02 C	0,04 B	0,03 CD	0,01 A	0,02 CD
Lodo 100	0,10 B	0,02 C	0,01 D	0,04 B	0,01A	0,03 C
Lodo 200	0,11 B	0,02 C	0,01 D	0,04 BC	0,01 A	0,04 B
Lodo 300	0,22 A	0,04 B	0,12 A	0,08 A	0,01 A	0,09 A
Estatística						
DMS (Tukey 5%)	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
F (Blocos)	2,29 NS	0,76 NS	2,25 NS	11,56 **	1,00 NS	0,62 NS
F (Tratamentos)	49,87 **	23,86 **	421,50 **	120,33 **	1,00 NS	198,69 **
C.V. (%)	18,53	19,02	11,04	9,22	23,54	12,25

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 8 - Quantidades totais acumuladas de micronutrientes e metais em folhas e ramos de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (mg vaso⁻¹) e comparações estatísticas.

Tratamentos	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Testemunha	0,03 A	n.d	0,17 C	8,11 C	1,65 E	0,08 A	0,52 C
F. Mineral	n.d	n.d	0,16 C	11,41 B	6,31 D	n.d	3,19 B
Lodo 100	n.d	n.d	1,61 A	11,06 B	11,32 B	n.d	13,90 A
Lodo 200	n.d	n.d	0,38 C	11,91 AB	8,12 C	n.d	14,86 A
Lodo 300	n.d	n.d	0,85 B	13,19 A	16,92 A	n.d	15,99 A
Estatística							
DMS (Tukey 5%)	-	-	0,27	1,66	1,58	-	2,51
F (Blocos)	-	-	1,39 NS	0,76 NS	1,19 NS	-	1,74 NS
F (Tratamentos)	-	-	107,28 **	25,89 **	264,24 **	-	169,94 **
C.V. (%)	-	-	18,70	6,63	7,92	-	11,48

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 9 - Quantidades totais acumuladas de micronutrientes e metais em panículas de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (mg vaso⁻¹) e comparações estatísticas.

Tratamentos	Zn	Cu	Mn	Fe	Cd	Pb	Cr
Testemunha	0,26 B	0,16 D	0,26 D	1,05 E	n.d	n.d	n.d
F. Mineral	1,51 A	0,41 B	2,27 C	3,76 B	n.d	n.d	n.d
Lodo 100	1,27 A	0,26 C	2,82 B	3,29 C	n.d	n.d	n.d
Lodo 200	1,26 A	0,25 C	2,22 C	2,44 D	n.d	n.d	n.d
Lodo 300	2,16 A	0,58 A	4,22 A	4,22 A	n.d	n.d	n.d
Estatística							
DMS (Tukey 5%)	0,92	0,04	0,34	0,40	-	-	-
F (Blocos)	3,50 *	0,88 NS	1,99 NS	1,35 NS	-	-	-
F (Tratamentos)	11,29 **	280,63 **	350,07 **	200,77 **	-	-	-
C.V. (%)	31,54	5,91	5,91	5,98	-	-	-

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 10 - Quantidades totais acumuladas de micronutrientes e metais em raízes de plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos (mg vaso⁻¹) e comparações estatísticas.

Tratamentos	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Testemunha	n.d	n.d	0,08 D	51,52 E	0,98 D	n.d	0,38 E
F. Mineral	n.d	n.d	0,24 C	115,38 B	1,08 CD	n.d	1,49 D
Lodo 100	n.d	n.d	0,31 B	64,91 D	2,30 B	n.d	6,01 B
Lodo 200	n.d	n.d	0,32 B	94,84 C	1,27 C	n.d	3,29 C
Lodo 300	n.d	n.d	0,73 A	176,34 A	3,80 A	n.d	8,32 A
Estatística							
DMS (Tukey 5%)	n.d	n.d	0,02	10,31	0,29	n.d	0,53
F (Blocos)	n.d	n.d	0,81 NS	1,50 NS	0,24 NS	n.d	1,11 NS
F (Tratamentos)	n.d	n.d	2107,79 **	462,83 **	355,15 **	n.d	783,03 **
C.V. (%)	n.d	n.d	3,09	4,54	6,72	n.d	5,98

NS = não significativos; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

APÊNDICE 11 - Equações matemáticas e variáveis estatísticas das análises de regressões lineares realizadas.

FIGURA	VARIÁVEIS	EQUAÇÕES	R
2	M,O (solo)	$y = 1,455x + 13,1$	0,81 NS
3	PH (solo)	$y = -0,59x + 6,46$	0,98 **
4	P (solo)	$y = 11,016x + 9,13$	0,77 NS
5	K (solo)	$y = 0,161x + 0,075$	0,86 NS
6	Ca (solo)	$y = -1,896x + 18,57$	0,91 *
7	Mg (solo)	$y = -0,39x + 2,36$	0,85 NS
8	CTC (solo)	$y = 5,00x + 32,53$	0,79 NS
9	V% (solo)	$y = -11,819x + 72,41$	0,92 *
10	B (solo)	$y = 0,06x + 0,20$	0,75 NS
11	Cu (solo)	$y = 1,00x - 0,49$	0,99 **
12	Fe (solo)	$y = 50,95x + 13,59$	0,88 NS
	Mn(solo)	$y = 11,87x + 87,17$	0,17 NS
13	Pb (solo)	$y = 0,147x + 0,43$	0,79 NS
14	Ni (solo)	$y = 0,14x - 0,02$	0,87 NS
15	Cd (solo)	$y = 0,013x - 0,005$	0,98 **
16	Cr (solo)	$y = 0,03x - 0,02$	0,94 *
17	Zn (solo)	$y = 4,77x + 1,105$	0,78 NS
19	M,S, (Folhas + Ramos)	$y = 10,256x + 23,409$	0,90 *
20	M,S, (Paniculas)	$y = 17,433x + 0,9192$	0,99 **
21	M,S, (Raízes)	$y = 5,9024x + 3,9308$	0,92 *
22	N (Folhas e Ramos)	$y = 0,06x + 0,08$	0,79 NS
23	N (Paniculas)	$y = 0,19x$	0,87 NS
24	N (Raízes)	$y = 0,06x - 0,03$	0,95 *
25	N (Folhas e Ramos)	$y = -0,01x - 0,07$	0,95 *
26	P (Paniculas)	$y = 0,04x + 0,02$	0,88 NS
27	P (Raízes)	$y = 0,01x + 0,01$	0,85 NS
28	K (Folhas e Ramos)	$y = 0,26x - 0,20$	0,80 NS
	Ca (Folhas e Ramos)	$y = 0,04x + 0,24$	0,46 NS
	K (Paniculas)	$y = 0,08x + 0,01$	0,80 NS
29	Ca (Paniculas)	$y = 0,02x + 0,02$	0,33 NS
30	K (Raízes)	$y = 0,03x - 0,03$	0,66 NS
31	Ca (Raízes)	$y = 0,02x$	0,92 *
32	Mg (Paniculas)	$y = 0,02x - 0,01$	0,87 NS
33	S (Folhas e Ramos)	$y = 0,05x + 0,05$	0,61 NS
34	S (Paniculas)	$y = 0,02x + 0,01$	0,90 *
35	S (Raízes)	$y = 0,03x - 0,02$	0,95 *
	Cu (Paniculas)	$y = 0,13x$	0,88 NS
36	Cu (Folhas e Ramos)	$y = 0,08x + 0,55$	0,17 NS
37	Cu (Raízes)	$y = 0,20x - 0,13$	0,94 *
38	Fe (Folhas e Ramos)	$y = 1,61x + 7,05$	0,96 *
39	Fe (Paniculas)	$y = 0,87x + 0,59$	0,83 NS
40	Fe (Raízes)	$y = 40,44x - 4,19$	0,93 *
41	Mn (Folhas e Ramos)	$y = 4,26x - 1,15$	0,86 NS
42	Mn (Paniculas)	$y = 1,128x - 0,44$	0,84 NS
43	Mn (Raízes)	$y = 0,74x + 0,23$	0,75 NS
44	Zn (Folhas e Ramos)	$y = 4,74x - 0,53$	0,84 NS
45	Zn (Paniculas)	$y = 0,57 - 0,19$	0,95 *
46	Zn (Raízes)	$y = 2,11x - 0,78$	0,79 NS

APÊNDICE 12 - Tipos de lagoas de estabilização mais utilizadas.
 FONTE: SPERLING (1996)

APÊNDICE 13 - Assoreamento e desassoreamento da lagoa facultativa de Ibirá-SP

13a - Assoreamento da lagoa facultativa de Ibirá-SP

13b - Início do desassoreamento da lagoa facultativa de Ibirá-SP