

HELENICE MOURA GONÇALVES

**TEORES DE METAIS PESADOS E DE ENXOFRE NO SOLO EM ÁREAS DE  
INFLUÊNCIA DE CANAIS E RESERVATÓRIOS DE VINHAÇA DE  
FERTIRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador:

**Prof. Dr. Jácomo Divino Borges**

Goiânia, GO - Brasil  
2008

HELENICE MOURA GONÇALVES

**TEORES DE METAIS PESADOS E DE ENXOFRE NO SOLO EM ÁREAS DE  
INFLUÊNCIA DE CANAIS E RESERVATÓRIOS DE VINHAÇA DE  
FERTIRRIGAÇÃO**

Dissertação DEFENDIDA e APROVADA em 21 de julho de 2008, pela Banca  
examinadora constituída pelos membros:

Prof. Dr. Rommel Bernardes da Costa  
Membro - UEG

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eliane Divina de Toledo Souza  
Membro - UFG

Prof. Dr. Jácomo Divino Borges  
Orientador - UFG

Goiânia, Goiás  
Brasil

*O mais sincero, puro, belo e encantador sorriso,*

*a luz da minha vida, meu tesouro, minha felicidade, meu amado filho...*

*...Henrique Antônio Gonçalves.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de todas as coisas, ao Divino Pai Eterno, pelas inúmeras maravilhas realizadas no decorrer de minha existência. À Nossa Senhora que sempre acolhe e ampara minhas orações e roga por mim a Deus.

À minha mãe Ionice Munis de Moura, por seu amor incondicional, pelo esmero e dedicação com os quais me criou, e por sempre me incentivar na prática dos estudos. À minha irmã Jéssica de Moura Pereira, por ser tão especial, amável e pela paciência durante todos esses anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jácomo Divino Borges, por sua dedicação e amizade, muitas vezes exercendo o papel de pai, me incentivando e acreditando em meu potencial, sendo exemplo como ser humano e profissional.

À Universidade Federal de Goiás (UFG) e à Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EA), destacada e grandiosa instituição de ensino público, gratuito e de qualidade, ressaltando os docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), pelos ensinamentos transmitidos, dedicação, apoio e atenção.

À empresa Jalles Machado S. A., especialmente ao gerente agrícola Eng. Agr. M. Sc. Rogério Augusto Bremm Soares e à sua equipe, pelo apoio financeiro e auxílio durante todas as fases de realização desta pesquisa.

Ao secretário do PPGA, Wellinton Barbosa Motta, por sua dedicação, incentivo e amizade demonstrados sempre com muita educação, atenção e carinho.

A todos meus colegas do PPGA, pelo companheirismo, apoio, pela saudável convivência e por fazerem parte dessa preciosa caminhada.

À Eng<sup>a</sup> Agr<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Mellissa Ananias Soler da Silva, pela disponibilidade e apoio na realização das análises estatísticas, e pela sua amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida durante a realização do Curso de Mestrado, e a toda sociedade brasileira, pela oportunidade de dedicar e desenvolver a presente pesquisa em uma Universidade pública e gratuita.

À Eng<sup>a</sup> Agr<sup>a</sup> Karla Kristina Silva Cavalcante e a toda sua equipe da Agência Municipal do Meio Ambiente (AMMA), da Prefeitura Municipal de Goiânia, pelo apoio logístico e pela sua amizade.

A todos que direta ou indiretamente estiveram comigo em mais essa etapa da vida, meus sinceros agradecimentos.

*“...Tudo é do Pai, toda honra e toda glória, é d’Ele  
a vitória alcançada em minha vida...”*

## SUMÁRIO

	<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	7
	<b>RESUMO</b> .....	8
	<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	10
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	13
2.1	FONTES ANTROPOGÊNICAS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO .....	13
2.2	A VINHAÇA .....	15
2.3	VINHAÇA DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA.....	18
2.4	METAIS PESADOS.....	22
2.4.1	<b>Mecanismo de tolerância das plantas aos metais pesados</b> .....	27
2.4.2	<b>Metais pesados e os animais superiores</b> .....	29
2.5	METAIS PESADOS E OS ANIMAIS SUPERIORES .....	30
2.5.1	<b>Boro</b> .....	30
2.5.2	<b>Ferro</b> .....	31
2.5.3	<b>Manganês</b> .....	31
2.5.4	<b>Zinco</b> .....	32
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	33
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS .....	33
3.2.1	<b>Canais de transporte de vinhaça</b> .....	34
3.2.2	<b>Reservatórios temporários de vinhaça</b> .....	35
3.3	PROCEDIMENTOS NAS ANÁLISES DE SOLO .....	36
3.4	PROCEDIMENTOS NAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
4.1	CANAIS DE TRANSPORTE DE VINHAÇA .....	37
4.2	RESERVATÓRIOS TEMPORÁRIOS DE VINHAÇA .....	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	48
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	49
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	51
<b>8</b>	<b>ANEXOS</b> .....	58

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Variação dos valores médios do pH e dos teores médios de macronutrientes, micronutrientes e matéria orgânica (MO), em um metro cúbico de vinhaça originada de diferentes tipos de mosto, no processamento da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.).....	18
<b>Tabela 2</b>	Elementos traços em sua forma mais tóxica e graus de fitotoxicidade e de toxicidade para animais mamíferos.....	24
<b>Tabela 3</b>	Elementos potencialmente tóxicos (EPT), concentrações máximas permitidas e recomendadas no biossólido, carga máxima e concentração permitida no solo.	25
<b>Tabela 4</b>	Valores críticos de metais pesados no solo.....	26
<b>Tabela 5</b>	Quantidades de micronutrientes absorvidas e removidas pela parte aérea de plantas de cana-planta e de cana-soca ( <i>Saccharum officinarum</i> L.).....	30
<b>Tabela 6</b>	Valores médios dos parâmetros químicos analisados na vinhaça <i>in natura</i> , em base líquida, resultante do processamento da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.) para a produção de álcool e açúcar, na Usina Jalles Machado, S.A., município de Goianésia, GO (médias de três repetições).....	34
<b>Tabela 7</b>	Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte externa de canais de transporte de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO.....	38
<b>Tabela 8</b>	Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte interna de canais de transporte de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO.....	39
<b>Tabela 9</b>	Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte externa de reservatório de armazenamento temporário de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO..	43
<b>Tabela 10</b>	Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte interna de reservatório de armazenamento temporário de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia,GO...	44

## RESUMO

GONÇALVES, H. M. **Teores de metais pesados e de enxofre no solo em áreas de influência de canais e reservatórios de vinhaça de fertirrigação.** 2008, 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO<sup>1</sup>.

Esta pesquisa objetivou avaliar os valores do pH e os teores de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre no perfil do solo, além do comportamento desses elementos com relação à acidez do solo em clima tropical, nas áreas de influência de canais e de reservatórios de vinhaça usada na fertirrigação de plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Adotou-se como tratamento testemunha o solo sob vegetação nativa não antropizada. Os tratamentos do primeiro ensaio consistiram de canais de vinhaça com três períodos de uso: um, três e 20 anos, totalizando sete tratamentos (testemunha e três canais, considerando as suas partes interna e externa), com quatro repetições cada. O segundo ensaio consistiu de quatro reservatórios de vinhaça com diferentes períodos de uso, tendo sido consideradas duas épocas: três anos (R3A e R3B) e 20 anos (R20A e R20B) seguidos, constituindo nove tratamentos (testemunha e quatro reservatórios, avaliando-se o solo das partes interna e externa), com quatro repetições cada. Na área testemunha e na parte externa dos canais e dos reservatórios foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm e 75-100 cm. Na parte interna (fundo) dos canais e dos reservatórios as amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm e 150-200 cm, em quatro pontos distintos, em áreas de Latossolo Vermelho Distrófico. O delineamento experimental foi de parcelas sub-divididas. Os resultados obtidos a partir das análises do solo foram submetidos à Análise de Variância e aos testes F e Tukey ( $P < 0,05$ ). O uso de canais e de reservatórios temporários de vinhaça ao longo dos anos não alterou significativamente os teores de metais pesados, sugerindo que seus teores acumulados no solo são aceitáveis. No entanto, os canais e os reservatórios devem ser revestidos com material impermeabilizante para evitar a lixiviação desses elementos e, conseqüentemente, a contaminação do lençol freático.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*, cana-de-açúcar, contaminação do solo, Latossolo Vermelho Distrófico

<sup>1</sup>Orientador: Prof. Dr. Jácomo Divino Borges.



## ABSTRACT

GONÇALVES, H. M. **Contents of heavy metals and sulphur on soil in areas of influence of channels and reservoirs of vinasse of fertigation.** 2008, 60 f. Dissertation (Master's degree in Agronomy: Crop Science) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.<sup>1</sup>

This study aimed to evaluate the values of pH and the levels of cadmium, chromium, nickel, lead, copper, iron, manganese, zinc and sulphur in the soil profile, beyond the behavior of those elements with respect to the acidity of soil in tropical climate, in areas of influence of channels and reservoirs of vinasse used in fertigation of sugarcane plants (*Saccharum officinarum* L.). Adopted as treatment witness the soil under a natural untouched savannah area. The treatments of the first test consisted of vinasse channels with three periods of use: one, three and 20 years, totaling seven treatments (control and three channels, considering the parts internal and external), with four repetitions each. The second test consisted of four vinasse tanks with different periods of use, and found two seasons: three years (R3A and R3B) and 20 years (R20A and R20B) followed, constituting nine treatments (control and four tanks, measuring up the soil of the parties internal and external), with four repetitions each. In witness and on the outside of channels and reservoirs were collected samples of soil at depths of 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm and 75-100 cm. On the inside (bottom) of channels and reservoirs, soil samples were collected at depths of 0-50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm and 150-200 cm, in four different points in areas of Red Latosol Distrophic. The experimental design was sub-divided plots. The results from the soil analyses were subjected to analysis of variance and testing F and Tukey ( $P < 0.05$ ). The use of vinasse channels and temporary reservoirs over the years didn't significantly alter the levels of heavy metals, suggesting that their contents accumulated in the soil are acceptable. However, channels and reservoirs should be covered with waterproofing material to prevent the leaching of these elements and therefore the contamination of the groundwater.

Keywords: *Saccharum officinarum*, sugarcane, soil contamination, Red Latosol Distrophic.

<sup>1</sup>Adviser: Prof. Dr. Jácomo Divino Borges.

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ambiente deve ser de interesse de toda sociedade. A sua pureza, ou seja, a pureza do ar, da água e do solo é de fundamental importância para a existência do homem. Em muitas regiões do globo os índices mínimos de pureza já não são mais alcançados. Muitos rios, lagos e represas tornaram-se depósitos de resíduos urbanos e industriais, solos vêm sendo contaminados com poluentes químicos e o ar, em muitos locais, tornou-se irrespirável. Muito dessa situação se deve ao uso indevido desses reservatórios naturais e, principalmente, do ponto de vista de disposição de resíduos (Freire & Cortez, 2000). A população tem percebido a ameaça à sua existência e tem reagido constantemente contra a destruição do meio onde se encontra, grande responsável pelo seu viver saudável.

O uso inadequado do solo pode ser uma fonte muito importante de poluição. O descuido do homem em controlar a erosão, por exemplo, faz do solo uma fonte potencial de contaminação das correntezas e lagos. O manejo não apropriado de defensivos, de águas de irrigação de baixa qualidade, a disposição indiscriminada de resíduos de indústrias ou domésticos redundam no acúmulo de substâncias no solo e estas podem ser tóxicas às plantas e, ao entrar na cadeia alimentar, ser letais aos animais e ao homem. Devido a esta possibilidade e dada a sua importância no ecossistema, o solo ocupa um papel de destaque no controle da qualidade do ambiente. O controle pode ser de boa ou má qualidade, dependendo muito da maneira como serão manejadas as reservas edáficas (Almeida, 1995).

Enquanto produzem bens de consumo para satisfazer as mais diversas necessidades da humanidade, as atividades produtivas aumentam a demanda por matérias-primas e energia (Oliveira, 2006). Uma das fontes de energia mais utilizadas é o petróleo, mas, em função do alto consumo e das disputas geopolíticas, o seu valor tem se mostrado inviável. Assim, torna-se necessária a sua substituição imediata, ou pelo menos a sua complementação, por fontes energéticas alternativas.

O Brasil é um país de dimensões continentais, situado na região tropical do globo terrestre, sujeita a altas taxas de insolação, fator essencial para a eficiência fotossintética das plantas. Possui, ainda, solos com aptidão agrícola diversificada, favorável para o cultivo da cana-de-açúcar, matéria-prima para a produção de álcool, um combustível menos energético que os derivados do petróleo, porém, menos poluente e obtido de fonte renovável.

A cultura da cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil pelos portugueses colonizadores, no século XVI, com a finalidade de produzir açúcar para abastecer o mercado europeu, logo se tornando a principal atividade econômica da então colônia, sustentando essa posição por mais de cem anos, perdendo-a, gradativamente, para outras atividades (ProCana, 2008). Atualmente, a cultura tem retomado espaço na economia nacional, principalmente após o uso do álcool como combustível veicular, que iniciou-se na década de 1970.

Segundo o Sindicato da Indústria de Fabricação de Açúcar e Álcool no Estado de Goiás (SIFAEG, 2008), o Brasil consolidou-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A estimativa da produção nacional de cana-de-açúcar destinada à indústria sucroalcooleira é de 475,07 milhões de toneladas, das quais 47,0% (223,48 milhões de toneladas) são para a fabricação de açúcar e 53,0% (251,59 milhões de toneladas) são para a produção de álcool. Quando comparada à safra 2006/2007, verifica-se um crescimento de 10,62% (45,60 milhões de toneladas). No Norte-Nordeste, o aumento foi de 11,24% (6,23 milhões de toneladas). O referido aumento foi em função das boas condições climáticas, dos bons tratamentos culturais, da irrigação e da introdução de novas variedades mais produtivas. No Centro-Sul verifica-se um incremento de 10,52% (39,37 milhões de toneladas).

No Estado de Goiás, a cultura da cana-de-açúcar vem ganhando importância nos últimos anos, ocupando os solos de melhor fertilidade e de topografia favorável. A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), Superintendência Regional de Goiás, realizou o levantamento de cana-de-açúcar, safra 2007/2008. Esse levantamento objetivou a mensuração da área cultivada, a produtividade esperada, a produção estimada de cana-de-açúcar a ser colhida e a destinação da cana esmagada. O resultado da pesquisa apresentou um aumento de área de 21,5%, uma produtividade 4,48% superior à safra anterior e um acréscimo de 26,95% na produção de cana-de-açúcar (Conab, 2008).

Em Goiás, a produção de cana-de-açúcar passou de 14,01 milhões de toneladas na safra 2004/2005 para 21,05 milhões de toneladas na safra 2007/2008. Este crescimento foi impulsionado pela maior demanda de álcool em todo o mundo, como forma de reduzir os níveis de poluição do meio ambiente, em função da maior produção de veículos com motores bicompostíveis (movidos a álcool e, ou, a gasolina) (Conab, 2008).

A expansão da área cultivada com cana-de-açúcar foi atribuída ao aumento da demanda por açúcar e álcool, tanto no mercado interno como no externo, à maior rentabilidade em relação às demais culturas cultivadas no Estado e pela certeza na comercialização e na maior liquidez da produção. A expectativa para os próximos anos é

de aumento na quantidade de usinas processadoras de cana-de-açúcar e de aumento na capacidade industrial instalada nas usinas existentes, fato já manifestado na safra atual (SIFAEG, 2008).

Goiás, atualmente, é o sexto estado brasileiro em área cultivada com cana-de-açúcar, conta, ainda com áreas para a expansão da cultura, principalmente naquelas de pastagens degradadas. Atualmente existem, instaladas no Estado de Goiás, mais de uma dezena de unidades produtoras de açúcar e, ou, álcool, com uma perspectiva de implantação de novas unidades a curto e médio prazos (SIFAEG, 2008). Existe, ainda, uma grande quantidade de pequenos produtores, que produzem cachaça, açúcar mascavo e outros derivados da cana-de-açúcar. Desse modo, a cana-de-açúcar também ocupa uma posição de destaque no agronegócio goiano. Porém, da mesma forma que este setor industrial produz divisas para o país, ele tornou-se um grande gerador de resíduos, como a água de lavagem da cana, as cinzas de caldeira, a torta de filtro e a vinhaça (Rosseto, 1987).

Com o rápido crescimento do setor sucroalcooleiro nas regiões tropicais do planeta e a adoção da técnica de aproveitamento da vinhaça como fonte de nutrientes suplementar, surgiu um problema inédito, que é a possibilidade de poluição dos solos por elementos carregados por esse resíduo (ProCana, 2008). É importante ressaltar que existem poucos estudos relativos ao tema, principalmente em solos situados em clima tropical.

Considerando-se que a prática mais adotada para o tratamento da vinhaça é a sua distribuição nos solos cultivados com cana-de-açúcar, e que esse resíduo traz certo teor de cátions dos metais pesados, ou metais pesados, cádmio, cromo, níquel e chumbo, dos micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco e do macronutriente enxofre, além do comportamento desses elementos com relação à acidez desses solos, e considerando, ainda, que são poucos os estudos do comportamento desses cátions nos solos, notadamente em Latossolos Vermelhos sob clima tropical. a presente pesquisa teve por objetivo avaliar os valores do pH e os teores desses elementos no solo em diferentes profundidades, nas áreas interna e externa de influência de canais e de reservatórios de vinhaça usada como insumo na fertirrigação de áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 FONTES ANTROPOGÊNICAS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO**

Desde o início de nossa civilização, de acordo com Mattiazzo (1992), o ar, o solo e os cursos d'água foram usados como forma natural de descarte dos resíduos gerados pela atividade humana. A preocupação atual com o volume e o destino final desses resíduos tem origem na conscientização de que não se pode continuar considerando a natureza como fonte inesgotável de recursos, dos quais o homem necessita para viver, como sítio para descarte indiscriminado de seus resíduos e, sobretudo, da conscientização de que o nosso meio tem uma capacidade específica, limitada para a depuração do que lhe é adicionado: os gases que fluem para a atmosfera e os esgotos domésticos e industriais sem tratamento.

Uma forma de minimizar o problema do descarte de resíduos é a sua reciclagem racional, mediante uma análise abrangente de suas características, potencial de uso e conseqüências desse uso e, nesse aspecto, surge como atrativo a reciclagem do resíduo através do seu uso agrônômico. Porém, quando se considera essa possibilidade, verifica-se a necessidade de um conhecimento ampliado por parte dos profissionais envolvidos, de fenômenos químicos, uma vez que estes resíduos, além dos desejáveis nutrientes e materiais orgânicos decomponíveis, podem conter compostos orgânicos e metais considerados tóxicos para os organismos vivos (Mattiazzo, 1992).

O descarte nos solos, na rede hidrográfica e a queima sempre foram as opções mais viáveis para os resíduos agroindustriais até poucos anos, porém, com o aumento da produção, houve aumento na quantidade de resíduos gerados e novas formas de descarte se impuseram como necessárias (Mattiazzo, 1992).

Segundo Lambais (1992), os resíduos orgânicos têm sido utilizados há séculos pelo homem para melhorar a produção agrícola, através de sua incorporação direta no solo. Porém, a microbiota do solo possui uma capacidade limitada para mineralizar esses resíduos, de forma que seu uso excessivo pode vir a poluir o solo.

O solo é constituído por um ecossistema composto de uma comunidade viva de microrganismos e macrorganismos em uma complexa matriz mineral e orgânica. As

características dos solos tropicais são, marcadamente, influenciadas por vários e importantes fatores (Mattiazzo, 1992). Conforme Buol et al. (1997), são cinco os principais fatores que influenciam a formação dos solos: material geológico de origem, ambiente, vegetação, relevo e o tempo de formação do solo. Devido à grande diferença em vários desses fatores ao longo das regiões tropicais, não é de se estranhar que os solos dessa região apresentem grande variação em suas propriedades.

Os solos tropicais, de acordo com Sanchez (1985), poderiam ser definidos como aqueles que não apresentam diferença significativa entre as temperaturas de verão e inverno a 50 cm de profundidade, sendo esta diferença inferior a 5 °C. Ressalta, ainda, que a expressão “solos tropicais” não descreveria uma categoria específica de propriedades de solo. Do mesmo modo, Uehara & Gillman (1981) destacam que “solos tropicais” seria uma expressão comum para descrever qualquer solo que ocorra nos trópicos e acrescentam que devido à sua idade, muitos solos tropicais desenvolveram sistemas contendo argilas de carga variável que lhes conferem propriedades físicas e químicas próprias, estimando que 60% dos solos tropicais contenham minerais de carga variável em contraste com aqueles temperados, em que o mesmo fato se verifica em 10% dos solos.

Para Sanchez (1985) devem ser consideradas várias generalizações a respeito dos solos tropicais, a saber:

- os tipos e as propriedades de argilas são mais variados nos trópicos que em regiões temperadas;
- muitos solos tropicais apresentam significativa capacidade de troca aniônica;
- o conteúdo de matéria orgânica nos solos tropicais é similar à daqueles de regiões temperadas;
- a adição e decomposição de matéria orgânica em solos tropicais é cerca de cinco vezes mais intensa que em solos de regiões temperadas;
- a queda do teor de umidade em solos tropicais retarda a decomposição da matéria orgânica, assim como as baixas temperaturas em solos temperados;
- a grande maioria dos solos tropicais é ácida;
- a grande maioria dos solos cultivados no trópico úmido constitui-se de solos não ácidos.

De acordo com Meurer (2000), o solo pode ser utilizado como descarte ou reciclagem de materiais poluentes, pois apresenta a capacidade de inativar vários compostos, através de reações químicas e da multiplicidade de processos microbiológicos. O solo pode inativar íons e compostos por adsorção, complexação ou precipitação. Os microrganismos do solo podem decompor os mais diversos materiais orgânicos, desdobrando-os em compostos menos tóxicos ou atóxicos. Entretanto, a adição de vários materiais ao solo pode contribuir, de forma benéfica, como corretivo de sua acidez, fornecendo nutrientes para as plantas, aumentando o teor de matéria orgânica e melhorando suas propriedades físicas e biológicas.

O uso das áreas agrícolas para o despejo de resíduos industriais tornou-se uma alternativa atrativa, tanto do ponto de vista econômico, quanto de possível reaproveitamento de nutrientes. O uso agrônômico desses resíduos industriais tem trazido preocupações, pois se argumenta que metais pesados, como cádmio, níquel, chumbo e outros, podem entrar na cadeia alimentar através de plantas e animais e, também, ao contaminarem as águas superficiais e subterrâneas (Hue & Ranjith, 1994).

Segundo Fernandes (2001), o uso de resíduos orgânicos, tais como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo urbano e resíduos industriais na agricultura, têm como motivos principais a utilização do solo como meio transformador e detoxificador e o fornecimento de nutrientes para as plantas. No entanto, estes resíduos contêm diferentes quantidades de metais pesados que podem atingir o solo e alcançar níveis tóxicos para a cadeia trófica. No solo, reações de adsorção, complexação, oxidação-redução e precipitação controlam a disponibilidade e a solubilidade dos metais.

## 2.2 A VINHAÇA

Para Freire & Cortez (2000), a vinhaça é um resíduo de consistência líquida, que se enquadra na definição de resíduo sólido, segundo critérios da NBR 10004 da ABNT (2004) e representou, em média, 56,65%, em peso, de todos os resíduos sólidos produzidos na safra 1993/1994 em dez usinas conveniadas à Coopersucar, segundo levantamentos da própria empresa. Essa porcentagem corresponde a, aproximadamente, 566 kg de vinhaça por tonelada de cana.

A vinhaça pode ser caracterizada sob diferentes aspectos, segundo Almeida (1995), a saber:

- Como fator de poluição dos cursos d'água, a vinhaça possui ação redutora extremamente alta, exigindo, conseqüentemente, uma elevadíssima taxa de oxigênio para se estabilizar, oxigênio este retirado da água; resiste tenazmente a quaisquer tipos de tratamentos usualmente empregados para outros resíduos industriais; é produzida em grandes volumes; é um dos mais ácidos e corrosivos resíduos poluidores;
- Como fator ictiológico, a vinhaça apresenta alta nocividade aos grandes animais aquáticos (peixes, sapos e crustáceos); dizima a fauna piscosa da água doce; afugenta a fauna marítima que procura as costas brasileiras para a desova; destrói peixes larvófagos, causando desequilíbrio biológico dos rios; acaba com os seres da microflora e da microfauna que formam o plâncton dos rios; mata as plantas aquáticas de vida submersa e flutuante;
- Como fator de insalubridade, a vinhaça ocasiona poluição dos cursos d'água; produz mau cheiro, em virtude da formação de gases fétidos; possui Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) superior a  $20.000 \text{ mg dm}^{-3}$ , tornando as águas, nas quais é lançada, impróprias para o consumo; confere à água cheiro nauseabundo, sabor desagradável, turbidez elevada, cor anormal e alta taxa de resíduos; agrava o problema de doenças endêmicas e proporciona o aumento da proliferação de insetos;
- Como fator de ordem social, a vinhaça provoca condições odiosas entre o industrial do álcool e da aguardente com o público em geral, que se indigna com a poluição ambiental;
- Como fator de fertilização ou de correção de solos, a vinhaça é um resíduo rico em matéria orgânica coloidal e em elementos minerais; contribui para elevar o pH dos solos, chegando mesmo a alcalinizá-los; melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos; aumenta a microflora, proporcionando mais fácil nitrificação e conferindo-lhe maior índice de fertilidade; propicia à cana-de-açúcar condições mais favoráveis ao seu ciclo vegetativo, aumentando sua riqueza em sacarina e pureza do caldo, se cortada na ocasião propícia, embora retardando a maturação; modifica os padrões das terras, determinando o aparecimento de plantas invasoras características e padrões de solos férteis e produtivos.

Inicialmente, de acordo com Kiehl (1985), esse efluente poluidor era lançado nos cursos d'água por se julgar que nossos solos, sendo predominantemente ácidos, não poderiam receber um líquido também ácido. Esperava-se que a terra se tornaria mais ácida, agravando a situação. Esta idéia perdurou até que um depósito de vinhaça se rompeu



acidentalmente e descarregou o volume depositado na lavoura de cana, o suficiente para inundar uma área considerável da propriedade. Foi então que aconteceu o inesperado: em lugar da inutilização da terra, a vinhaça contribuiu com sua fertilização, fazendo-a produzir canas com alto vigor. Através de análises dos solos da área inundada e da área contígua não atingida, constatou-se que a reação do solo passara de ácido para alcalino. Este fato foi, mais tarde, atribuído à rápida humificação da matéria orgânica contida na vinhaça, em forma coloidal, além da ação do húmus sobre o alumínio acidificante do solo e à formação dos chamados humatos alcalinos, fatores responsáveis pela elevação do pH.

Pela amplitude de seus efeitos maléficos e, ao mesmo tempo, benéficos, aliados à ampliação das exigências por parte dos órgãos ambientais, apoiados em uma legislação cada vez mais severa, a procura por soluções ambientalmente corretas e que levem em consideração a viabilidade econômica para o descarte deste resíduo é incessante. Para tanto, as universidades, juntamente com os órgãos oficiais de pesquisa e a iniciativa privada, buscam respostas para as questões que se apresentam para sua utilização como fonte de nutrientes para as próprias culturas de cana-de açúcar (Kiehl, 1985).

De acordo com Tiveron Filho (2000), tem-se buscado, incessantemente, o desenvolvimento de técnicas racionais de manejo e controles operacionais desse resíduo, procurando solucionar ou minimizar os problemas maléficos e maximizar seus efeitos benéficos.

Dentre as técnicas de neutralização desse poluente, a mais adotada e aceita pela legislação ambiental vigente é o seu aproveitamento como fertilizante de solos, desde que utilizada em áreas cultivadas com a própria cana. O processo é controlado desde o momento em que a vinhaça é produzida pela indústria, até quando é lançada ao solo, com prejuízos mínimos para o ambiente (Freire & Cortez, 2000).

A vinhaça, de acordo com Glória & Orlando Filho (1983), além dos materiais orgânicos e elementos químicos úteis como fertilizantes, traz alguns elementos químicos conhecidos como metais pesados, não absorvíveis pelas plantas e altamente poluentes.

A adição contínua de vinhaça ao solo pode proporcionar o aumento da concentração de macronutrientes, micronutrientes e metais pesados, podendo acarretar sua contaminação e, dependendo da profundidade do lençol freático, os reservatórios de água contidos no subsolo também podem vir a ser contaminados. A ação desses elementos é pouco conhecida e é necessário um trabalho mais específico sobre o aumento de sua concentração no solo, bem como as conseqüências ambientais. Neste aspecto, os estudos que contemplam informações científicas sobre este assunto são relevantes para subsidiar o

conhecimento dos efeitos da vinhaça no meio ambiente, bem como redefinir o seu reaproveitamento racional, visto que é resíduo de um importante segmento da indústria nacional, que é a sucroalcooleira (Ramalho, 1996).

### 2.3 VINHAÇA DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

A composição química da vinhaça, de acordo com Dematté (1992), é bastante variável, principalmente em função do tipo de mosto utilizado na fermentação para a produção de álcool (Tabela 1).

Tabela 1. Variação dos valores médios do pH e dos teores médios de macronutrientes, micronutrientes e matéria orgânica (MO), em um metro cúbico de vinhaça originada de diferentes tipos de mosto, no processamento da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L).

Parâmetros	Mosto do melaço	Mosto misto	Mosto do caldo
pH	4,20 - 4,40	3,50 - 4,50	3,50 - 4,00
N (kg m <sup>-3</sup> )	0,57 - 0,79	0,30 - 0,50	0,20 - 0,40
P (kg m <sup>-3</sup> )	0,04 - 0,15	0,10 - 0,80	0,10 - 0,50
K (kg m <sup>-3</sup> )	3,28 - 6,30	2,10 - 3,40	1,10 - 2,00
Ca (kg m <sup>-3</sup> )	1,32 - 1,72	0,60 - 1,50	0,10 - 0,80
Mg (kg m <sup>-3</sup> )	0,51 - 0,84	0,30 - 0,60	0,20 - 0,40
S (kg m <sup>-3</sup> )	0,35	1,60	2,00
Cu (g m <sup>-3</sup> )	3,00 - 90,00	2,00 - 57,00	1,00 - 18,00
Fe (g m <sup>-3</sup> )	52,00-120,00	47,00 - 130,00	45,00 - 110,00
Mn (g m <sup>-3</sup> )	6,00 - 11,00	5,00 - 6,00	5,00 - 10,00
Zn (g m <sup>-3</sup> )	3,00 - 4,00	3,00 - 50,00	2,00 - 3,00
MO (kg m <sup>-3</sup> )	37,20 - 56,90	19,10 - 45,10	15,30 - 34,70

Fonte: Dematté (1992).

Analisando a produção sucroalcooleira, Corazza (1999) assegura que, se busca associar os benefícios econômicos da atividade produtiva à qualidade ambiental, se busca o uso sustentável dos recursos ambientais e a distribuição equitativa dos benefícios daí decorrentes, julga-se então conveniente usar este momento também para repensar os modelos produtivos. Desnecessário dizer que os impactos econômicos das atividades do setor sucro-

alcooleiro, assim como de outros quaisquer, devam ser ponderados pela natureza de seus efeitos sócio-ambientais.

A vinhaça é um subproduto do processo de fabricação de etanol a partir da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar. Durante décadas, mesmo quando ainda não era gerada nos grandes volumes atuais, a vinhaça já provocava, nos órgãos de controle ambiental e, particularmente, na comunidade científica, alguma preocupação quanto aos seus impactos sobre a qualidade dos recursos naturais. Naquele momento o resíduo era despejado nos mananciais de superfície. Com a implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), contudo, os danos ambientais causados à flora e à fauna desses mananciais, principalmente devido à carga orgânica da vinhaça, adquiriram uma dimensão preocupante. A dimensão do problema ambiental da destinação da vinhaça se associa à importância econômica histórica da própria agroindústria canavieira em nosso país (Corazza, 1999).

Dentre as várias opções para se encontrar a alternativa mais adequada para o descarte da vinhaça, Corazza (1999) cita a possibilidade de se queimá-la. A combustão da vinhaça é a alternativa onde o resíduo é concentrado e queimado na caldeira. O consumo elevado de energia para evaporar a água da vinhaça, contudo, não compensa ainda a economia de energia na destilaria. As pesquisas nesta alternativa devem buscar a melhoria do balanço energético.

A produção de levedura a partir da vinhaça, conforme Corazza (1999), também é uma tecnologia alternativa, que permite reduzir a descarga de vinhaça. Contudo, dois fatores concorrem para a elevação dos custos desta alternativa. Em primeiro lugar, o fato de que se deve acrescentar à vinhaça sais de amônia e de magnésio para se obter o fermento seco. Em segundo lugar, e talvez o mais importante, o fato de ser elevado o consumo de energia para a evaporação da água da vinhaça, requerida neste processo.

Para Corazza (1999), a vinhaça pode ter aplicação na construção civil, adicionada à massa de cimento. Também existem estudos sobre a fabricação de materiais de construção, principalmente tijolos, a partir da vinhaça, sendo que foram feitos avanços significativos quanto à resistência do material obtido.

A fabricação de ração animal, a partir da vinhaça, também é uma possibilidade estudada durante os anos 1980, segundo Corazza (1999). O resíduo deve ser tratado para a redução do nível de potássio, podendo ser utilizado como ração para bovinos, suínos e aves. Ressalta-se que a ração assim produzida não interfere no sabor ou odor do leite e seus derivados, que tem boa aceitação pelos animais e que a taxa de conversão (ganho de peso com relação ao consumo de ração) é adequada. Há, porém, limitações de dosagem

que devem ser obedecidas. Em ruminantes, por exemplo, a ração feita da vinhaça não pode ultrapassar 10% da alimentação diária, e em suínos não deve ultrapassar de 2% a 3%. As pesquisas, realizadas desde a década de 1970, buscavam a redução de potássio, da DBO e o aumento da aceitabilidade.

A digestão anaeróbia da vinhaça tem a seu favor o argumento econômico da produção do metano. O desenho e aperfeiçoamento do biodigestor contou com esforços de diversas instituições públicas e privadas. Problemas técnicos, como o longo tempo de retenção e a granulação do lodo de microrganismos, foram superados e a biodigestão anaeróbia da vinhaça é, atualmente, considerada tecnicamente viável, sendo possível encontrar uma unidade (de escala industrial) em operação na Usina São Martinho (Pradópolis, SP). A eliminação da DBO, embora grande, não dispensa o tratamento posterior, conforme trabalho desenvolvido por Corazza (1999). Ainda, de acordo com o mesmo autor, a constituição da vinhaça, rica em água e minerais, associada às dificuldades técnicas e econômicas envolvidas em seu tratamento aparecem como as razões arroladas com maior frequência para justificar a adoção e a ampla difusão da prática vigente para o destino da vinhaça, a fertirrigação. Esta é uma técnica amplamente adotada pela agroindústria canavieira nacional, notadamente a partir da década de 1980, em substituição ao lançamento do resíduo em cursos d'água, a qual consiste na infiltração da vinhaça *in natura* (ou não tratada) no solo, com o objetivo de fertilizá-lo e, ao mesmo tempo, de irrigar a cultura da cana-de-açúcar.

A fertirrigação é empregada como expediente substituto ao uso da fertilização mineral, constituindo uma fonte de nutrientes, principalmente de potássio. A quase totalidade das indústrias de açúcar e álcool utiliza a vinhaça produzida para fertirrigação e as principais razões da ampla difusão desta prática são, segundo Corazza (1999):

- Baixo investimento inicial requerido (tanques de decantação, caminhões e, atualmente, bombas e dutos);
- Baixo custo de manutenção (pouco pessoal, diesel e eletricidade gerada localmente);
- Rápida disposição da vinhaça no solo (sem necessidade de grandes reservatórios reguladores);
- Ganhos compatíveis com o investimento (há lucros com a reciclagem do potássio no solo e o retorno do investimento é bastante rápido);
- Fecha o ciclo interno que envolve a parte agrícola e a industrial no mesmo setor, diminuindo a dependência de insumos externos (fertilizantes);

- Não envolve uso de tecnologia complexa;
- Aumento da produtividade da safra e da produtividade na fabricação do açúcar;
- Mesmo diante das vantagens proporcionadas pela adoção da fertirrigação, restam, ainda, dúvidas quanto a adequação da prática do ponto de vista da proteção dos recursos naturais, principalmente no que diz respeito a seus efeitos de longo prazo;
- O uso de volumes elevados de vinhaça pode fazer aumentar o nível de potássio no caldo da cana. Além disso, há controvérsias sobre salinização do solo e contaminação de aquíferos subterrâneos;
- Se os efeitos da descarga da vinhaça sobre os mananciais de superfície são bastante conhecidos a ponto de não mais suscitarem disputas, o mesmo parece não ocorrer com os impactos ambientais de sua disposição no solo.

A atividade sucroalcooleira identifica-se como um dos fatores de vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos paulistas. Neste sentido, os trabalhos desenvolvidos por Corazza (1999) encontraram metodologias que foram desenvolvidas para monitoração do risco da contaminação do lençol freático e realizaram estudos ainda inconclusivos sobre o tema.

Sabe-se que a aplicação, sem critérios, da vinhaça ao solo pode causar um desequilíbrio de nutrientes, gerando resultados diferentes daqueles esperados. A dosagem ideal de aplicação de vinhaça varia segundo o tipo de solo e segundo as variedades de cana-de-açúcar. Os riscos da aplicação de grandes volumes de vinhaça por hectare incluem o perigo de salinização do solo. Infelizmente, não se dispõem de estudos que ofereçam um mapa da situação atual sobre a fertirrigação, detalhando os volumes de vinhaça aplicados, seja por região, seja por produtor. Apesar disso e do fato da grande difusão da fertirrigação, a Copersucar divulgou, em 1986, a informação de que cerca de 40% da vinhaça produzida no Estado de São Paulo ainda não era aproveitada, sendo descartada em áreas de despejo ou sacrifício, prática que tem sido autorizada com restrições pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), segundo Corazza (1999).

Para Corazza (1999), a fertirrigação constituiu, sem dúvida, um progresso quando comparada ao expediente anterior, em que a vinhaça era despejada nos mananciais de superfície. Entretanto, muitas vezes o descarte, ou mesmo a fertirrigação, se dá em quantidades excessivamente elevadas e, ou, próximo a esses mananciais. Em que se pese que os rios drenem (e não "banham") as regiões, ou seja, sendo os cursos d'água

verdadeiros sistemas de drenagem das bacias hidrográficas, não se sabe até que ponto uma prática não controlada da fertirrigação pode deixar de comprometer esses recursos.

Tendo em vista essas considerações, interpreta-se a fertirrigação mais como um paliativo ou como uma prática que confere ao observador a falsa impressão de estar solucionando, de fato e com eficiência, o problema da vinhaça. Sua continuidade no longo prazo requer um estudo detalhado sobre seus impactos e sustentabilidade ambientais (Oliveira, 2006).

O aproveitamento agrícola dos resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira no Brasil, conforme citado por Pólo et al. (1998), constitui-se numa prática, de certa forma, bastante generalizada, tanto no caso dos efluentes líquidos (principalmente a vinhaça), como dos sólidos (bagaço e torta de filtro).

Devido aos problemas ambientais causados pela produção média de 1.000 litros de vinhaça por tonelada de cana-de-açúcar processada (Rodella & Ferrari, 1997), a solução mais adequada para este problema é retornar esses resíduos para as áreas de cultivo da cana-de-açúcar para substituir, total ou parcialmente, a adubação mineral (Glória & Orlando Filho, 1983).

## 2.4 METAIS PESADOS

De acordo com CONAMA (1986), são considerados metais pesados os elementos que possuem massa específica maior que  $5,0 \text{ g cm}^{-3}$ . No entanto, essa classificação é pouco utilizada. Atualmente, os termos metais pesados, metais pesados ou elementos-traço são utilizados genericamente para os elementos químicos que contaminam o meio ambiente e podem provocar diferentes níveis de danos à biota (Oliveira, 2006).

Os principais elementos químicos enquadrados neste conceito são: prata, arsênio, cádmio, cobalto, cromo, cobre, mercúrio, níquel, chumbo, antimônio, selênio e zinco. Estes elementos são encontrados naturalmente no solo em concentrações que variam de miligrama por quilograma a grama por quilograma, as quais são inferiores àquelas consideradas tóxicas para diferentes organismos vivos. Dentre eles, arsênio, cobalto, cromo, cobre, selênio e zinco são essenciais para os organismos vivos (Ramalho, 1996).

Os termos elementos-traço, sinônimos de metal pesado ou tóxico, de acordo com Mattiazzo (1992), se referem aos elementos que ocorrem em níveis bastante baixos, de poucas partes por milhão, em um sistema. São considerados sinônimos para elementos-

traço os microelementos, os micronutrientes e os metais pesados. A designação micronutriente dada a um metal lhe confere um caráter inequívoco dentro da ciência da nutrição de plantas. Os metais cobre, ferro, zinco, manganês, cobalto e molibdênio são micronutrientes, isto é, elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, embora exigidos em pequenas quantidades, ou seja, os metais considerados micronutrientes são também classificados como metais pesados, aos quais se somam os elementos cádmio, níquel, chumbo, titânio, mercúrio, e outros elementos de transição da tabela periódica.

Segundo Malavolta (1994), qualquer elemento, macronutriente ou micronutriente benéfico, pode se tornar tóxico quando presente no tecido vegetal em concentrações ou teores suficientemente altos. Os elementos classificados como tóxicos prejudicam o crescimento e a produção das plantas, mesmo quando presentes na matéria seca em teores relativamente baixos. Nas condições naturais, possivelmente, o elemento tóxico mais típico seja o alumínio.

A toxidez dos metais pesados para as plantas e, eventualmente, para os animais, tem duas causas: a própria natureza e o homem, isto é, antropogênica. Nos dois casos, evidentemente, o motivo para que a toxidez do elemento se manifeste é o aumento de sua disponibilidade no solo (Malavolta, 1994). Para Curi & Franzmeier (1997) e Oliveira et al. (1999), os teores de metais pesados no solo refletem, em maior ou menor grau, os teores dos mesmos no material de origem, exceção feita nos casos de intensa deposição desses elementos através de ação antrópica. Na Tabela 2 encontram-se alguns elementos-traço e suas respectivas toxicidades para plantas e mamíferos.

Conforme Silva (1995), para uso na agricultura devem ser os seguintes os limites máximos aceitos internacionalmente para os teores médios, respectivamente, de acordo com as legislações pertinentes ao assunto, dos Estados Unidos da América, da Holanda e da Escócia, em  $\text{mg kg}^{-1}$ : Cd (85, 10 e 20), Cr (3.000, 500 e 2.000), Ni (420, 100 e 25), Pb (840, 500 e 1.500), Cu (4.300, 600 e 1.500) e Zn (7.300, 2.000 e 2.500). A legislação inglesa define como limites máximos para os metais Cd, Cr e Pb, respectivamente, 35  $\text{mg kg}^{-1}$ , 700  $\text{mg kg}^{-1}$  e 400  $\text{mg kg}^{-1}$ .

Tabela 2. Elementos traços em sua forma mais tóxica e graus de fitotoxicidade e de toxicidade para animais mamíferos.

Elementos (forma mais tóxica)	Fitotoxicidade	Toxicidade para mamíferos
Ag <sup>+</sup>	Alta	Alta
B (OH) <sub>3</sub>	Média	Baixa
Cd <sup>2+</sup>	Média-alta	Alta
CrO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Média-alta	Média
Cu <sup>+2</sup>	Média-alta	Alta
Hg <sup>2+</sup>	Alta	Media
MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Média	Média
Ni <sup>2+</sup>	Média-alta	Média
Pb <sup>2+</sup>	Média	Alta
SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Média-alta	Alta
Zn <sup>2+</sup>	Baixa-média	Baixa-média

Fonte: Meurer (2000), adaptado de McBride (1995).

O solo recebe, segundo Accioly & Siqueira (2000), grande quantidade de rejeitos, como é o caso dos bio-sólidos, por ser a maneira mais fácil e de menor custo de sua disposição final. A qualidade desses resíduos é determinada de acordo com as concentrações máximas permissíveis e as recomendadas para sua disposição no solo, conforme preconizado pela United States Environmental Protection Agency (USEPA) (Tabela 3). Entretanto, alertam que adotar os limites estabelecidos para os países de clima temperado, em solos com elevada toxidez, baixo teor de matéria orgânica, elevada atividade biológica e argila de baixa atividade, como predominam no Brasil, estes podem representar grande risco.

Para Ramalho et al. (1999), esses metais pesados acumulados no solo podem tornar-se disponíveis para absorção pelas plantas e entrar na cadeia alimentar humana. Entretanto, segundo Mattiazzo et al. (2001), ainda não foi estabelecido um método que estime eficientemente teores fitodisponíveis de metais pesados em solos e em espécies vegetais diferentes.

Os metais pesados no solo podem estar presentes em minerais primários e secundários, precipitados ou co-precipitados, adsorvidos, na solução do solo ou em microrganismos, plantas e animais. Apresentam interações bastante complexas com a fase sólida, envolvendo reações de adsorção e dessorção, precipitação e dissolução, complexação e oxirredução, tanto na fase inorgânica, quanto na orgânica. Os graus de mobilidade, atividade e



biodisponibilidade dos metais pesados dependem de vários fatores, tais como: pH, temperatura, potencial redox, capacidade de troca catiônica (CTC), competição com outros metais, ligação com ânions e composição e força iônica da solução do solo. A maior ou menor mobilidade dos metais pesados é devida aos atributos do solo, como teores e tipo de argila, pH, CTC, teor de matéria-orgânica, entre outros parâmetros, que influenciam nas reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução. A mobilidade dos metais pesados no solo é influenciada pela superfície específica, textura, densidade aparente, teor de matéria-orgânica, tipo e concentração de minerais de argila, além do tipo e dos teores de metais (Schmitt & Sticher, 1991; Mattiazzo et al., 2001; Costa & Oliveira, 2004).

Tabela 3. Elementos potencialmente tóxicos (EPT), concentrações máximas permitidas e recomendadas no biossólido, carga máxima e concentração permitida no solo.

EPT	Concentração no biossólido (mg)		Limite de carga no solo (kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Concentração permitida no solo (mg kg <sup>-1</sup> )
	Máxima permitida	Recomendada		
Arsênio	75,00	-	2,00	-
Cádmio	85,00	20,00	2,00	20,00
Chumbo	840,00	750,00	15,00	180,00
Cromo	3.000,00	-	150,00	1.530,00
Cobre	4.300,00	1.000,00	75,00	770,00
Mercúrio	57,00	16,00	0,85	8,50
Molibdênio	75,00	-	0,90	50,00
Níquel	420,00	300,00	21,00	230,00
Selênio	100,00	-	5,00	-
Zinco	7.500,00	2.500,00	140,00	1.460,00

Fonte: USEPA (1986), citada por Accioly & Siqueira (2000).

A disponibilidade de metais é, geralmente, baixa em valores de pH entre 6,5 e 7,0 e a sua mobilidade é reduzida com o aumento do pH, devido à precipitação de formas insolúveis, como hidróxidos, carbonatos e complexos orgânicos (Kabata-Pendias & Pendias, 1987). Moolenaar & Beltrami (1998) relatam sobre a interferência da matéria-orgânica na retenção dos metais, formando associações organo-metálicas que podem ocorrer tanto na fase sólida como na fase líquida, e o húmus e outras formas orgânicas podem quelatar os

metais e formar moléculas estáveis, alterando, assim, a disponibilidade dos metais. As concentrações totais dos metais pesados no solo devem ser comparadas com uma faixa limite, acima das quais a toxicidade é considerada possível (Amaral Sobrinho et al., 1992) (Tabela 4).

Tabela 4. Valores críticos de metais pesados no solo.

Metais pesados	Valor do metal tóxico (mg kg <sup>-1</sup> )	
	Comum	Crítico
Cádmio	0,25	3,00 - 8,00
Chumbo	20,00	100,00 - 400,00
Níquel	50,00	100,00
Cobre	20,00	60,00- 125,00
Zinco	50,00	70,00 - 400,00
Cobalto	0,50-6,50	25,00 - 50,00
Cromo	5,00-150,00	75,00 - 100,00
Manganês	20,00-10.000,00	500,00 - 3.000,00

Fonte: Adaptado de Amaral Sobrinho et al. (1992).

Outra fonte de metais pesados aplicada como fertilizante é o lodo de esgoto um dos principais temas quando se considera o impacto ambiental gerado pela adição desse resíduo ao solo e, suas principais preocupações relacionam-se com a possibilidade dos metais pesados entrarem na cadeia alimentar, de redução da produtividade agrícola, de acúmulo no solo, de alteração da atividade microbiana e de contaminação de recursos hídricos (Pires et al., 2005).

Segundo Williams (1987), em solos tratados com o resíduo lodo de esgoto, a mobilidade de metais pesados tem sido apontada como nula ou muito baixa. No entanto, a persistência da capacidade do solo em reter esses elementos em função do tempo, dos níveis de ocorrência da contaminação, dos fatores climáticos envolvidos e das taxas de degradação da matéria orgânica dos diferentes resíduos contaminantes, vêm sendo muito questionadas.

Os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em um Argissolo Vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar, em Piracicaba, SP, foram avaliados por Silva (1995), tendo constatado que o lodo atuou como fertilizante para a cultura, principalmente como fonte de cálcio, fósforo e zinco. Os aumentos nos teores de metais pesados no solo e nos

colmos da cana-de-açúcar não ofereceram qualquer risco de passagem para a cadeia trófica e de se acumularem no produto final.

As características químicas de um Latossolo Vermelho-amarelo, tratado com diferentes doses de lodo de curtume e cultivado com plantas de milho, foram avaliadas por Borges (2003), que verificou um aumento dos valores de pH, pela correção da acidez do solo e nos teores dos elementos cálcio, fósforo e enxofre.

A matéria orgânica do solo, presente no lodo de esgoto adicionado ao solo, fornece sítios de exposição para adsorção de cátions (Petruzzeli et al., 1994). No entanto, a adição desse resíduo orgânico pode aumentar a solubilidade de metais, pela produção de ligantes que quelatizam os metais, bloqueando a sua adsorção e promovendo a lixiviação de complexos solúveis e estáveis como os metais (Ashworth & Alloway, 2004).

Ao analisar trabalhos de vários autores a respeito da afinidade de metais pesados em relação a alguns constituintes do solo, Ross (1994) inferiu que o produto de todas as interações possíveis pode levar à expressão de teores característicos de materiais de origem, visto que, conforme a constituição predominante do solo pode-se esperar a presença de um ou outro elemento em maior ou menor intensidade, intimamente associado ao material de origem e aos processos de formação do solo.

Foi verificado, por Costa & Oliveira (2004), em estudos sobre metais pesados em uma topossequência, no Triângulo Mineiro, que solos desenvolvidos de basalto apresentavam maior potencial de disponibilidade de cobre e zinco, enquanto que em solos desenvolvidos de gnaiss apresentavam maior potencial de associação ao chumbo.

#### **2.4.1 Mecanismo de tolerância das plantas aos metais pesados**

Segundo Malavolta (1994), os mecanismos conhecidos ou postulados para explicar a tolerância das plantas aos metais pesados são reunidos em três categorias principais: a) limitação na absorção; b) compartimentação; c) desintoxicação bioquímica, e cita que algumas espécies vegetais possuem a característica de acumular quantidades extremamente altas de determinados metais pesados sem sofrerem conseqüências prejudiciais.

Têm sido registrados casos em que determinadas plantas servem como indicadoras da presença de minérios (cobre, ferro, manganês, chumbo, zinco e mesmo prata e ouro). Não se conhece o motivo pelo qual tais plantas têm esta capacidade de acumular os metais pesados em seus tecidos. As espécies folhosas, como a alface e o espinafre, são consideradas

as maiores acumuladoras de metais pesados que as tuberosas, como a cenoura, a beterraba e o rabanete (Hoffmann & Schweiger, 1983; Zurera et al., 1987).

Em um Latossolo Vermelho-amarelo húmico, segundo Gomes et al. (1999), amostras dos horizontes A e B foram incubadas, em condições de casa de vegetação, com diferentes concentrações, em  $\text{mg cm}^{-3}$ , de sais de Cd (A - 0,0; 0,4; 2,4 e 7,2 e B - 0,0; 0,4; 1,6 e 3,6), Cr (A - 0; 22; 132 e 396 e B - 0; 22; 88 e 198), Cu (A - 0; 12; 72 e 216 e B - 0; 12; 48 e 108), Ni (A - 0; 6; 36 e 108 e B - 0; 6; 24 e 54), Pb (A - 0; 16; 96 e 288 e B - 0; 16; 64 e 144) e Zn (A - 0; 4; 24 e 72 e B - 0; 4; 16 e 36), por seis meses. Após, as amostras de solo foram adubadas e cultivadas com alface (*Lactuca sativa* L.) var. Grand Rapids Nacional. Aos 38 dias, as plantas foram colhidas e separadas as raízes, os caules e as folhas inferiores e superiores. Observou-se redução no crescimento das plantas, nas maiores doses dos metais, e variações nos teores de matéria orgânica do solo tiveram pouca influência na disponibilidade de cádmio para a alface. No entanto, foram importantes para cobre e chumbo. O cromo não foi detectado no material vegetal, em razão da intensa adsorção deste metal para as partículas do solo, óxidos de ferro e, possivelmente, outras fases minerais do solo. O aumento dos valores do pH do solo e a competição com cálcio reduziram drasticamente a disponibilidade de níquel para as plantas. A translocação de cobre para a parte aérea foi pequena, mas a concentração de cádmio nas folhas foi diretamente proporcional à concentração nas raízes.

O lodo de esgoto aplicado em alta dose ( $100 \text{ mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) no solo por dois anos consecutivos, de acordo com Jarausch-Wehrheim et al. (1999), promoveram concentrações elevadas de zinco em todos os tecidos das plantas de milho, tendo sido detectados, inicialmente, teores de  $400 \text{ mg g}^{-1}$  de zinco nas raízes, e acima de  $500 \text{ mg g}^{-1}$  de zinco nas partes mais baixas do colmo, em plantas jovens, enquanto que nos grãos maduros os teores de zinco foram de  $0,050 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Os teores de metais pesados, incluindo os micronutrientes, apresentam concentração na matéria seca na seguinte ordem, de forma decrescente: folhas > raízes de reserva > tubérculos > frutos carnosos > sementes, enquanto que os metais pesados absorvidos pelas plantas estão praticamente distribuídos de forma equitativa entre a parte aérea e as raízes (Malavolta, 1994).

## 2.4.2 Metais pesados e os animais superiores

Alguns metais pesados desempenham, em concentrações baixas, conforme citado por Catalá et al. (1983), funções biológicas essenciais para o homem. Outros, ao contrário, como cádmio, mercúrio e chumbo trazem sérios problemas, pela sua comprovada toxicidade para o organismo humano.

De acordo com Wittmann (1981), os metais essenciais, em quantitativos inferiores a 0,01% da massa do organismo vivo, seguem a tendência geral de, em baixos níveis de suprimentos, levar a uma deficiência; em quantidades adequadas, oferecer condições ótimas e, em excesso, provocar efeitos tóxicos, podendo atingir o grau da letalidade. Para Leite (1982), o risco deste mecanismo de ação consiste na amplitude do intervalo entre o nível ótimo e o nível tóxico de determinado elemento, o qual, freqüentemente, é bastante pequeno.

As pesquisas de Ossanai (1980) detectaram que os compostos de cromo, na concentração de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ , são tóxicos para os peixes de água doce e, também, que os peixes parecem ser relativamente tolerantes ao cromo, mas alguns invertebrados aquáticos são mais sensíveis. Segundo Dorst (1973), inúmeros sais minerais, de chumbo, zinco, cobre, mercúrio, níquel, cádmio e prata precipitam e tornam compacto o muco que cobre as brânquias dos peixes, impedindo, dessa forma, as trocas gasosas que se realizam através desses órgãos.

Estudos desenvolvidos nos Estados Unidos da América, de acordo com Ossanai (1980), indicaram que o cromo é o único elemento cujos teores concentrados nos tecidos parece diminuir com o aumento da idade da população humana, mas a concentração nos pulmões não diminui, sugerindo que o cromo aí localizado não se encontra em equilíbrio com o restante do corpo.

O cádmio acessa o organismo humano pelas vias respiratórias e, ou, pela via gastro-intestinal, podendo ser encontrado no organismo adulto em quantidades de 25 mg a 30 mg, concentrando-se, preferencialmente, no fígado e nos rins (Catalá et al., 1983). O chumbo, de acordo com os mesmos autores, é o metal tóxico que tem merecido maior atenção pelos numerosos problemas que causa, tanto pelo interesse na multiplicidade de vias de entrada no organismo, como pela sua elevada toxicidade e amplo espectro de órgãos e sistemas afetados no homem e em animais domésticos.

## 2.5 MICRONUTRIENTES PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo Orlando Filho (2001), a absorção de micronutrientes pela cana-de-açúcar é influenciada por diversos fatores, destacando-se a idade da planta, o tipo de solo e a variedade cultivada. As curvas de adsorção dos micronutrientes permitem a verificação das épocas em que são demandadas maiores quantidades, assim como quanto é removido do solo pela parte aérea, em especial pelos colmos industriais. O autor verificou que os micronutrientes avaliados nos colmos de cana-de-açúcar apresentam-se na seguinte ordem de importância: Fe > Mn > Zn > Cu > B, principalmente em cana-soca (Tabela 5).

Tabela 5. Quantidades de micronutrientes absorvidas e removidas pela parte aérea de plantas de cana-planta e de cana-soca (*Saccharum officinarum*).

Micro-nutrientes	Cana-planta			Cana-soca		
	Colmos	Folhas	Colmos+folhas	Colmos	Folhas	Colmos+folh
(g 100 t <sup>-1</sup> )						
Boro	195	116	311	102	55	157
Cobre	194	93	287	273	116	389
Ferro	2.378	6.512	8.890	1.207	4.538	5.745
Manganês	1.188	1.651	2.838	916	1.189	2.105
Zinco	440	282	722	298	163	561

Fonte: Orlando Filho (2001).

### 2.5.1 Boro

O boro é absorvido pelas plantas através do ácido bórico não dissociado, que é predominante na solução do solo. Apesar de essencial para a vida das plantas, a função do boro não está totalmente esclarecida. O íon borato pode complexar açúcares, indicando a probabilidade de sua participação no transporte de carboidratos das folhas para os órgãos, função essa bastante importante para a cultura da cana-de-açúcar. Os sintomas de deficiência de boro são, na realidade, de deficiências de glúcídeos, nas partes jovens das plantas (Orlando Filho, 2001).

Conforme citado por Sobral & Weber (1983), a absorção de boro, quando excessiva, pode provocar toxicidade, que é traduzida por clorose nas margens e pontas das folhas, progredindo da base para a ponta da lâmina foliar. A clorose estende-se às folhas mais velhas, e as pontas das folhas podem ficar severamente queimadas.

### 2.5.2 Ferro

O elemento ferro é um dos maiores componentes da litosfera (5%). O cobre, o zinco e o manganês podem induzir deficiência de ferro, presumivelmente, por inibição competitiva. Ainda que o ferro se desloque das folhas para as raízes, ou das sementes às plântulas, a redistribuição é muito pequena: as folhas mais velhas ficam verdes enquanto as novas amarelecem, em caso de deficiência de ferro (Malavolta, 1994).

O aumento da disponibilidade do manganês em solos ácidos, de acordo com Faquin (1994), inibe competitivamente a absorção de ferro, causando o aparecimento de sintoma de deficiência deste elemento na planta.

### 2.5.3 Manganês

Todas as rochas da crosta terrestre contêm manganês, geralmente em concentrações mais altas que a de todos os outros metais pesados, exceto a do ferro. O manganês ocorre em rochas eruptivas básicas, em seus mais altos teores, de 1.000 mg kg<sup>-1</sup> a 2.000 mg kg<sup>-1</sup>. Nas eruptivas ácidas, metamórficas e em algumas sedimentares, sua faixa de variação é de 200 mg kg<sup>-1</sup> a 1.200 mg kg<sup>-1</sup>; nas calcárias é de 400 mg kg<sup>-1</sup> a 600 mg kg<sup>-1</sup> e nos arenitos seus teores variam de 20 mg kg<sup>-1</sup> a 500 mg kg<sup>-1</sup> (Malavolta, 1994).

O manganês é absorvido na solução do solo na forma Mn<sup>+2</sup>; desempenha papel fundamental na respiração, participando de diversas reações no ciclo de Krebs. Na planta, esse micronutriente é parcialmente móvel, e os sintomas de sua deficiência aparecem, inicialmente, em folhas mais novas. Os sintomas de deficiência de manganês na planta são semelhantes aos do ferro, com a diferença que a clorose internerval pode ocorrer do meio para a ponta das lâminas foliares (Orlando Filho, 2001).

Altos valores de pH do solo limitam a disponibilidade de manganês para a planta, e os sintomas de sua deficiência nas folhas podem ocorrer. A deficiência de manganês está associada com elevados teores de magnésio, cálcio e nitrogênio no solo. No Brasil, alguns solos de Tabuleiros, na região canavieira do Nordeste, requerem correção com este nutriente, (Orlando Filho, 2001).

#### 2.5.4 Zinco

O crescimento da cana-de-açúcar é afetado pelo zinco, uma vez que esse elemento é fundamental na síntese do triptofano, que é precursor do ácido indolacético (AIA). Este ácido forma as enzimas responsáveis pelo crescimento e alongamento das plantas. Por esse motivo, as plantas deficientes em zinco apresentam os internódios curtos (carretéis) (Orlando Filho, 2001).

Os sintomas de deficiência de zinco, por ser este elemento móvel na planta, de acordo com Orlando Filho (2001), aparecem, inicialmente, nas folhas novas, com o surgimento de estrias cloróticas na lâmina foliar, coloração amarelo-bronzeada nas pontas das folhas e inserção mais ereta da folha.

Conforme Marinho & Albuquerque (1981), em ensaios conduzidos no Estado de Alagoas, foram obtidos aumentos de 14% a 24% na produtividade agrícola com a aplicação de 10 kg ha<sup>-1</sup> de Zn no sulco de plantio da cana. Aplicando 60 kg ha<sup>-1</sup> de ZnSO<sub>4</sub>, Veluchamy et al. (1994) obtiveram aumentos na produtividade de cana-de-açúcar, variedade Co 85061.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A presente pesquisa foi conduzida em condições de campo, no interior de áreas cultivadas com a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), na empresa Jalles Machado, S.A., no município de Goianésia, GO, situada nas coordenadas geográficas 15° 10' de latitude Sul e 49° 15' de longitude Oeste de Greenwich e 640 m de altitude (Brasil, 1983). O clima local é classificado, segundo Köppen, como tropical de savana, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso (Aw), e média pluvial anual de 1.500 mm. O relevo é suave ondulado e o solo dessas áreas foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, de acordo com Embrapa (1999).

#### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ENSAIOS

A pesquisa consistiu da coleta e análise de amostras de solo em canais de transporte e reservatórios temporários de vinhaça, considerando-se a parte interna, bem como a parte externa destes, nas áreas próximas e de influência dos mesmos, constituindo dois ensaios.

Para ambos ensaios adotou-se o mesmo tratamento testemunha, localizado na área de Reserva Legal denominada Mata dos Macacos, que caracteriza-se por apresentar vegetação nativa não antropizada, com espécies florestais representativas da formação vegetacional de Floresta Estacional Semi-Decidual, com transição para Savana Florestada (Cerradão). Nesta área, as amostras de solo foram coletadas em quatro pontos distintos, nas profundidades de 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm e 75-100 cm, numa mesma trincheira.

As amostras de solo, cada qual com aproximadamente 500 g, em todos os tratamentos, foram coletadas e acondicionadas individualmente em sacos plásticos transparentes de polietileno, medindo 20,0 cm por 30,0 cm, que receberam uma etiqueta contendo a data da coleta e os demais dados que as identificavam com os respectivos tratamentos, repetições e profundidades. Estas foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solos e Folhas (LASF) da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EA),

da Universidade Federal de Goiás (UFG), para serem analisadas quimicamente, tendo sido determinados os teores de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, manganês, ferro, zinco e enxofre, e os valores do pH.

Foram coletadas e analisadas quimicamente três amostras compostas de vinhaça produzida na empresa Jalles Machado, S.A. (Tabela 6). Cada amostra de vinhaça foi composta por dez sub-amostras coletadas em diferentes canais de transporte e reservatórios temporários de vinhaça que integram o sistema de fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar.

Tabela 6. Valores médios dos parâmetros químicos analisados na vinhaça *in natura*, em base líquida, resultante do processamento da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) para a produção de álcool e açúcar, na empresa Jalles Machado S.A., município de Goianésia, GO (médias de três repetições).

Parâmetro	Valor médio	Parâmetro	Valor médio
Resíduos sólidos totais (kg m <sup>-3</sup> )	54,800	Zn (g m <sup>-3</sup> )	2,950
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,700	Cu (g m <sup>-3</sup> )	0,333
N (kg m <sup>-3</sup> )	0,495	Fe (g m <sup>-3</sup> )	57,000
P (kg m <sup>-3</sup> )	0,137	Mn (g m <sup>-3</sup> )	20,170
K (kg m <sup>-3</sup> )	6,120	Cd (g m <sup>-3</sup> )	0,003
Ca (kg.m <sup>-3</sup> )	1,917	Ni (g m <sup>-3</sup> )	0,206
Mg (kg m <sup>-3</sup> )	0,500	Pb (g m <sup>-3</sup> )	0,058
S (disp.) (kg m <sup>-3</sup> )	0,917	Cr (g m <sup>-3</sup> )	0,042
C (kg m <sup>-3</sup> )	8,330	M.O. (kg m <sup>-3</sup> )	14,670
C/N	16,820	DBO (mg L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	11.133,000

### 3.2.1 Canais de transporte de vinhaça

Foram selecionados três canais principais de distribuição de vinhaça, usada na fertirrigação de plantas de cana-de-açúcar. Os canais, com profundidade média de 0,70 m, que constituíram os tratamentos, se caracterizavam pelo tempo de uso, tendo sido considerados três períodos de uso. Para o primeiro período foi selecionado um canal de vinhaça com apenas um ano de uso; o segundo período consistiu de um canal de vinhaça usado durante três anos seguidos, enquanto que para o terceiro período considerou-se um canal com 20 anos seguidos de uso.

No interior dos canais, em quatro pontos distintos no fundo de cada um dos três canais, com 50 m de distância entre si, após a interrupção do fluxo de vinhaça, foram coletadas, com auxílio de um trado, amostras compostas de solos, cada qual constituída por cinco amostras simples, nas profundidades de 0-50 cm; 50-100 cm; 100-150 cm e 150-200 cm. Foram coletadas, também, amostras de solos nas profundidades de 0-25 cm; 25-50 cm; 50-75 cm e 75-100 cm em quatro pontos distintos, na projeção dos pontos de coletas de amostras realizadas no fundo dos canais, localizados a um metro de afastamento da parte externa do respectivo canal, evitando-se as áreas contíguas com estradas internas, por estas apresentarem o solo compactado.

Este ensaio constituiu-se de sete tratamentos (testemunha e três canais, considerando as suas partes interna e externa), com quatro repetições cada, identificados como: Testemunha; C1D-Canal com um ano, área interna; C1E-Canal com um ano, área externa; C3D-Canal com três anos, área interna; C3E-Canal com três anos, área externa; C20D-Canal com 20 anos, área interna; e C20E-Canal com 20 anos, área externa. Foi adotado o delineamento experimental de parcelas sub-divididas, em função das diferentes profundidades amostradas. O tratamento testemunha consistiu da análise do solo coletado na área da Mata dos Macacos, para efeito de comparação com os resultados dos tratamentos localizados nas áreas externas dos canais.

### **3.2.2 Reservatórios temporários de vinhaça**

Os reservatórios temporários de vinhaça selecionados para a retirada das amostras de solo para a realização das análises químicas caracterizavam-se pelo seu tempo de uso. O primeiro consistiu de dois reservatórios utilizados durante três anos seguidos (R3A e R3B), enquanto para o segundo tempo de uso foram considerados outros dois reservatórios utilizados durante 20 anos seguidos (R20A e R20B).

Estes reservatórios, construídos no final de canais de distribuição de vinhaça, são usados para estocar o excedente da vinhaça ainda não utilizada na fertirrigação. A vinhaça acumulada nos reservatórios é aplicada na cultura da cana-de-açúcar, na forma de fertirrigação, através de bombeamento, quando seu nível aproxima da cota máxima. Os reservatórios foram escavados no solo, tendo, em média, 15 m de comprimento, 8 m de largura e 2 m de profundidade, e não possuem qualquer tipo de revestimento nas laterais e no fundo.

No interior de cada um dos quatro reservatórios, após seu completo esvaziamento, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-50 cm; 50-100 cm; 100-150 cm e 150-200 cm, a partir do fundo do reservatório, em quatro pontos diferentes, identificados, respectivamente, por R3AD, R3BD, R20AD e R20BD. Nas proximidades de cada reservatório, nas áreas externas adjacentes aos mesmos, foram marcados quatro pontos, cada um destes locado a 5 m de distância da respectiva borda, correspondente a cada lado do reservatório, onde foram coletadas amostras de solo, a partir do fundo dos canais, nas profundidades de 0-25 cm; 25-50 cm; 50-75 e 75-100 cm (tratamentos R3AE, R3BE, R20AE e R20BE).

Este ensaio conduzido nos reservatórios constituiu-se de nove tratamentos (testemunha e quatro reservatórios, considerando as partes interna e externa), com quatro repetições cada, foi adotado o delineamento experimental de parcelas sub-divididas.

### 3.3 PROCEDIMENTOS NAS ANÁLISES DE SOLO

Os procedimentos adotados na realização das análises químicas do solo seguiram a metodologia preconizada pela Embrapa (1997). Os teores de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), foram extraídos em solução de Mehlich I, seus valores foram medidos através da leitura em espectrofotômetro de absorção atômica. A determinação da acidez ativa (pH) foi realizada em  $\text{CaCl}_2$ .

### 3.4 PROCEDIMENTOS NAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram analisados, estatisticamente, os valores médios dos seguintes parâmetros: pH, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, ferro, manganês, zinco e enxofre. Os resultados obtidos a partir das análises do solo foram submetidos à Análise de Variância, os dados foram, posteriormente, submetidos ao teste de Tukey a 5% de significância. O teste F, a 5% de significância, foi aplicado aos valores com o objetivo de verificar a interação entre os tratamentos e as profundidades amostradas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CANAIS DE TRANSPORTE DE VINHAÇA

Os resultados das análises químicas do solo, em diferentes profundidades, nas partes externa e interna dos canais de vinhaça, para os teores de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, manganês, ferro, zinco e enxofre, e os valores do pH, estão apresentados nas Tabelas 7 e 8 e Anexo 1.

Nas condições do experimento, em todas as variáveis avaliadas, somente apresentaram efeito significativo os elementos cobre, ferro, zinco e enxofre e o pH do solo, que apresentou valores variando de 4,08 (C20E, 25-50 cm) (Tabela 7) a 6,10 (C1D, 150-200 cm) (Tabela 8). Esses valores de pH são esperados para os solos tropicais, especialmente os Latossolos, os quais, devido o seu elevado intemperismo e boa drenagem no perfil, apresentam como característica inerente à elevada lixiviação de íons, especialmente cátions trocáveis, e elevada acidez (Santos et al., 2006). Segundo Sillanpää (1980), a disponibilidade dos micronutrientes para as plantas é afetada, de modo geral, pelos fatores pH, matéria orgânica, textura, minerais de argila, teor de umidade, potencial redox, temperatura e interações com os outros nutrientes.

Observou-se que o solo na parte externa dos canais com um e três anos apresentaram valores de pH superiores aos do solo da Testemunha em todas as profundidades avaliadas (Tabela 7). Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito residual do acúmulo de vinhaça por diferentes períodos, pois, embora esse resíduo apresente pH ácido após um determinado tempo da aplicação no solo, o pH pode sofrer abrupta elevação, devido à ação dos microrganismos presentes no meio (Rossetto, 1987; Silva & Ribeiro, 1998).

Os teores de cádmio não diferiram significativamente entre os tratamentos, e os maiores valores foram observados na Testemunha. Teores de cádmio no solo da mata nativa podem ter sofrido influência pedogenética. Segundo Fassbender (1980), na natureza os metais pesados podem originar-se das rochas, e os solos resultantes dos processos de intemperismo de rochas e, dessa forma, acabam por conter os metais pesados herdados da rocha-matriz.

Tabela 7. Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte externa de canais de transporte de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO<sup>(\*)</sup>.

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb	Cu	Fe	Mn	Zn	S	pH (CaCl <sub>2</sub> )
	mg dm <sup>-3</sup>									
0 - 25 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,50 Aa	3,75 Aa	3,00 Aa	3,20 CDa	51,05 Ca	41,63 Aa	0,55 Ba	6,90 Da	4,33 BCa
C1E <sup>(1)</sup>	0,10 Ba	1,17 Ca	1,10 BCa	1,15 Ba	2,13 Ca	51,68 Ca	18,68 Ba	1,05 Ba	55,33 ABa	4,68 Ca
C3E <sup>(2)</sup>	0,08 Ba	1,76 BCa	0,65 Ca	1,40 Ba	1,25 CDa	70,00 Ca	22,53 Ba	1,53 Ba	85,58 Ba	4,98 Ca
C20E <sup>(3)</sup>	0,08 Ba	1,96 BCa	1,20 BCa	1,14 Ba	0,63 Da	43,85 Ca	11,78 Ba	0,63 Ba	29,50 CDa	4,45 Da
25 - 50 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,75 Aa	3,00 Aa	3,25 Aa	3,23 CDab	47,68 Ca	26,53 Ab	0,43 Bb	5,90 Db	4,15 BCa
C1E	0,10 Ba	1,17 Ca	0,90 BCa	1,14 Ba	1,43 Cab	43,03 Ca	10,90 Bb	0,40 Bb	56,08 ABb	4,73 Ca
C3E	0,10 Ba	1,56 BCa	0,43 Ca	1,15 Ba	1,13 CDab	48,73 Ca	11,45 Bb	0,85 Bb	22,00 Bb	4,80 Ca
C20E	0,08 Ba	1,97 BCa	1,30 BCa	1,14 Ba	0,55 Dab	39,68 Ca	6,38 Bb	0,35 Bb	9,68 CDb	4,08 Da
50 - 75 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,25 Aa	3,75 Aa	3,50 Aa	3,10 CDb	51,73 Ca	20,38 Ab	0,33 Bb	4,90 Db	4,33 BCa
C1E	0,08 Ba	1,17 Ca	0,80 BCa	1,14 Ba	1,55 Cb	56,53 Ca	5,80 Bb	0,33 Bb	52,83 ABb	4,93 Ca
C3E	0,12 Ba	2,18 BCa	0,40 Ca	1,15 Ba	0,93 CDb	55,20 Ca	7,05 Bb	0,58 Bb	25,85 Bb	4,68 Ca
C20E	0,10 Ba	1,56 BCa	1,20 BCa	1,44 Ba	0,40 Db	37,43 Ca	7,83 Bb	0,30 Bb	9,58 CDb	4,13 Da
75 - 100 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,75 Aa	3,00 Aa	3,25 Aa	3,05 CDb	54,70 Ca	21,83 Ab	0,33 Bb	6,90 Db	4,33 BCa
C1E	0,15 Ba	1,56 Ca	0,90 BCa	1,43 Ba	1,68 Cb	64,73 Ca	5,93 Bb	0,43 Bb	54,23 ABb	4,93 Ca
C3E	0,08 Ba	2,15 BCa	0,68 Ca	1,14 Ba	0,70 CDb	38,03 Ca	5,33 Bb	0,38 Bb	27,25 Bb	4,68 Ca
C20E	0,08 Ba	1,19 BCa	1,10 BCa	1,42 Ba	0,38 Db	36,63 Ca	9,75 Bb	0,35 Bb	13,10 CDb	4,13 Da

Obs.: 1-Canal com um ano de uso; 2-Canal com três anos de uso e 3-Canal com vinte anos de uso.

\* Letras iguais, maiúsculas para o mesmo tratamento e diferentes profundidades e minúsculas para a mesma profundidade e diferentes tratamentos, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05) entre si.

Tabela 8. Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte interna de canais de transporte de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO<sup>(\*)</sup>.

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb	Cu	Fe	Mn	Zn	S	pH (CaCl <sub>2</sub> )
	mg dm <sup>-3</sup>									
0 - 50 cm										
C1D <sup>(1)</sup>	0,26 Ba	1,95 Ba	0,90 BCa	1,43 Ba	7,18 Aa	553,38 Ba	13,43 Aa	4,63 Aa	38,13 ABb	5,43 Ac
C3D <sup>(2)</sup>	0,08 Ba	2,54 ABa	0,88 BCa	1,40 Ba	3,90 Ba	447,33 Aa	18,08 Ba	4,60 Aa	44,08 Ab	4,18 BCc
C20D <sup>(3)</sup>	0,11 Ba	2,34 BCa	1,40 Ba	1,15 Ba	2,18 Ca	215,25 Ca	20,08 Ba	1,73 Ba	32,10 BCb	4,98 ABc
50 - 100 cm										
C1D	0,10 Ba	1,95 Ba	1,30 BCa	1,15 Ba	5,60 Aa	232,35 Ba	6,53 Aa	2,05 Aa	60,40 ABab	5,58 Abc
C3D	0,11 Ba	2,74 ABa	0,70 BCa	1,15 Ba	3,60 Ba	635,00 Aa	24,53 Ba	3,48 Aa	63,25 Aab	4,63 BCbc
C20D	0,10 Ba	1,76 BCa	1,65 Ba	1,42 Ba	1,63 Ca	128,00 Ca	15,75 Ba	0,60 Ba	32,68 BCab	5,50 ABbc
100 - 150 cm										
C1D	0,08 Ba	1,95 Ba	0,90 BCa	1,15 Ba	4,83 Aa	208,65 Ba	7,35 Aa	3,13 Aa	66,25 ABab	5,83 Aab
C3D	0,08 Ba	1,95 ABa	0,73 BCa	1,15 Ba	3,23 Ba	671,33 Aa	9,28 Ba	1,48 Aa	70,25 Aab	5,58 BCab
C20D	0,10 Ba	1,96 BCa	1,20 Ba	1,15 Ba	1,50 Ca	141,05 Ca	10,55 Ba	0,75 Ba	36,33 BCab	5,38 ABab
150 - 200 cm										
C1D	0,10 Ba	2,34 Ba	1,20 BCa	1,15 Ba	6,00 Aa	440,50 Ba	14,25 Aa	6,60 Aa	66,70 ABa	6,10 Aa
C3D	0,10 Ba	2,17 ABa	0,60 BCa	1,14 Ba	2,95 Ba	606,68 Aa	11,05 Ba	1,25 Aa	85,00 Aa	5,63 BCa
C20D	0,10 Ba	1,96 BCa	1,30 Ba	1,12 Ba	1,28 Ca	106,00 Ca	15,00 Ba	0,50 Ba	42,58 BCa	6,00 ABa

Obs.: 1-Canal com um ano de uso; 2-Canal com três anos de uso e 3-Canal com vinte anos de uso.

\* Letras iguais, maiúsculas para o mesmo tratamento e diferentes profundidades e minúsculas para a mesma profundidade e diferentes tratamentos, não diferem significativamente (Tukey, P < 0,05) entre si.

A incidência de cromo também foi superior na Testemunha. Os teores desse metal tóxico encontrados no solo nos tratamentos avaliados apresentam-se na faixa de valores médios-baixos citadas por Souza & Lobato (2004), que consideram que o teor de cromo no solo extraído por solução Mehlich I, é baixo se menor que  $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ; médio se estiver entre  $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$  e alto acima de  $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ . Assim sendo, esta ocorrência não deve ser considerada preocupante, quanto à qualidade do meio ambiente.

Para os elementos níquel e chumbo foram verificadas diferenças significativas, tendo-se observado, para a Testemunha, teores muito superiores aos dos demais tratamentos, tanto da parte interna quanto da externa dos canais de transporte de vinhaça, ressaltando a possível interferência nos teores desses elementos no solo com o tipo de material de origem do solo da mata nativa (Tabela 7). No entanto, para o níquel além da diferença com a testemunha, verificou-se que os seus teores no tratamento C20D, nas diferentes profundidades, foram estatisticamente superiores aos teores analisados nos demais tratamentos com vinhaça (Tabelas 7 e 8).

Não foi verificado qualquer enriquecimento, seja por tempo de uso ou em profundidade, nos teores dos metais pesados cádmio, cromo, níquel e chumbo nas amostras de solo analisadas, mostrando a pouca mobilidade destes elementos no perfil do solo. Apesar dos solos das áreas estudadas terem sido classificados como Latossolos, e como esta região é muito antiga, datada do período pré-cambriano, algumas áreas podem estar sobre pontas de rochas que apresentam os metais níquel e chumbo de forma mais evidente em sua composição.

Os teores médios de cobre variaram entre  $0,380 \text{ mg dm}^{-3}$  (C20E, 75-100 cm) (Tabela 7) e  $7,180 \text{ mg dm}^{-3}$  (C1D, 0-50 cm) (Tabela 8). Foi observado um maior teor desse micronutriente nos canais com menor tempo de uso (um e três anos). No solo dos canais com 20 anos, tanto nas áreas externa quanto interna, não evidenciou acúmulo deste metal pesado. A disponibilidade do cobre é afetada pelo pH, tendendo a diminuir com a sua elevação fato esse devido à diminuição na solubilidade do elemento na forma de óxidos, aumento da quantidade adsorvida sobre superfícies ou precipitada e, ainda, maior estabilidade das ligações com a matéria orgânica a valores de pH mais elevado, pois, quando há elevação do pH, a concentração de cobre associado aos ligantes orgânicos também aumenta (Harmsen & Vlek, 1985; McBride, 1995).

De maneira geral, os teores de cobre encontrados apresentaram-se superiores aos limites estabelecidos, sendo que os teores aceitáveis desse elemento, em área de cultivo, segundo Souza & Lobato (2004), estão entre  $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ . Pode-se inferir que há interferência do material de origem nos teores de cobre nos solos analisados,



pois, conforme Oliveira (2006), a região é formada por rochas basálticas e que geralmente possuem elevados níveis de metais em sua composição, e entre eles pode estar o metal cobre. No tratamento Testemunha, provavelmente, ocorreu a interação da matéria orgânica e dos compostos orgânicos, com o cobre, aumentando, assim, a sua disponibilidade.

Os teores médios do elemento ferro, no solo, diferiram significativamente entre os tratamentos. Houve influência dos diferentes tempos de uso na infiltração continuada de vinhaça. Altos teores de ferro foram encontrados nas maiores profundidades da parte externa e em todas as profundidades da parte interna dos canais com três anos, indicando um possível início de processo erosivo, pois é sabido que a matéria orgânica aumenta a estabilidade dos agregados, o que diminui a propensão à erosão, porém, o ferro e a matéria orgânica são antagonicos, o que justifica essa ocorrência, nesta situação. Esses dados mostram que os teores de ferro no solo sofreram alteração devido à deposição de vinhaça.

Segundo Oliveira (2006), um fator que se deve considerar é a classificação dos solos estudados, pertencentes à classe Latossolos, sendo uma das características básicas desse tipo de solo o seu alto teor de ferro na forma de óxidos, principalmente a hematita e a goethita, que justificam, de maneira geral, esses altos teores de ferro nos tratamentos. Na Testemunha o alto teor pode ser justificado também pelo baixo valor do pH que favorece a disponibilidade do  $Fe^{+2}$ . Os teores de ferro disponíveis no solo, encontrados por Souza & Lobato (2004), variaram de  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $60 \text{ mg dm}^{-3}$ , sugerindo que os resultados obtidos nas diferentes profundidades na parte externa dos canais de vinhaça, podem ser considerados normais e aceitáveis em solos próximos às áreas de cultivos agrícolas.

O manganês no solo apresentou teores que diferiram significativamente entre a Testemunha e os demais tratamentos (Tabelas 7 e 8). O solo da área interna de todos os canais, independente do tempo de uso, e a Testemunha apresentaram os maiores teores médios de Mn, e diferiram significativamente dos demais tratamentos. De maneira quase geral, constata-se que houve aumento nos teores de Mn nos tratamentos da área interna dos canais e nas camadas mais profundas, o que infere na possibilidade de, com o decorrer dos anos de uso, o elemento ter sido solubilizado e lixiviado, podendo, ainda, estar acumulando nas camadas inferiores, ou percolando para camadas subterrâneas e, até mesmo, atingindo o lençol freático.

Os teores de manganês fitodisponíveis no solo, conforme citado por Souza & Lobato (2004), dentro da faixa de  $1,9 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , não são considerados tóxicos. Os solos da região de Goianésia apresentam, geralmente, em sua composição, altos teores de manganês (Oliveira, 2006; Severiano, 2007), que podem estar interferindo nos elevados teores disponíveis encontrados nos solos analisados (Oliveira, 2006). Tendo como referência os

autores acima citados, os teores de Mn no solo, observados neste trabalho, estão muito acima dos teores considerados padrões.

As amostras de solo da parte interna (fundo) dos canais com um e três anos apresentaram os maiores teores médios de zinco, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos avaliados (Tabela 8). Verifica-se, ao longo do perfil, de modo quase geral, um maior acúmulo deste elemento nas menores profundidades. No solo da área externa dos canais de vinhaça verifica-se que não houve diferença significativa entre os teores de zinco, dos diferentes tratamentos e profundidades (Tabela 7). Conforme Silva et al. (2001), o teor médio de Zn total em solos agrícolas varia de  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $194 \text{ mg dm}^{-3}$ . Para Souza & Lobato (2004), os teores de zinco fitodiponíveis no solo, de forma a não promover toxicidade às plantas, estão dentro da faixa de  $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $1,6 \text{ mg dm}^{-3}$ . Os teores de zinco no solo, obtidos na parte externa dos canais e contíguas com as áreas de cultivo da cana-de-açúcar, se encontram inseridos nos intervalos preconizados por esses autores, podendo ser considerados aceitáveis, nestas circunstâncias, mas nas internas é preocupante.

Os maiores teores médios de enxofre no solo na parte externa dos canais de vinhaça foram encontrados com os menores tempos de uso ( $C1 > C3 > C20$ ), exceto na profundidade de 0-25 cm, e estes diferiram significativamente dos valores encontrados no solo da Testemunha (Tabela 7). No processo de produção de açúcar e álcool, o caldo extraído passa por um processo de clarificação para retirada de sólidos em suspensão. O caldo é sulfitado e caleado para facilitar a floculação das substâncias coloidais (Usina Ester, 2007). Assim, é possível observar que nos solos na parte externa dos canais mais antigos (C20E) (Tabelas 7 e 8), a concentração de  $S\text{-SO}_4^{2-}$ , tende a diminuir, enquanto que nos canais com menor tempo de uso há um maior acúmulo de enxofre no solo, tanto na área externa quanto na área interna (fundo) dos canais.

## 4.2 RESERVATÓRIOS TEMPORÁRIOS DE VINHAÇA

Os resultados das análises químicas do solo, em diferentes profundidades, nas partes externa e interna dos reservatórios de vinhaça, para os teores de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, manganês, ferro, zinco e enxofre, e valores do pH, estão apresentados nas Tabelas 9 e 10 e Anexo 2. As concentrações totais destes íons observadas no solo na parte externa dos reservatórios temporários de vinhaça (Tabela 9) evidenciam que o solo apresenta teores abaixo dos níveis críticos citados por Fadigas et al. (2002).

Tabela 9. Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte externa do reservatório de armazenamento temporário de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO<sup>(6)</sup>.

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb	Cu	Fe	Mn	Zn	S	pH (CaCl <sub>2</sub> )
	mg dm <sup>-3</sup>									
0 - 25 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,50 Aa	3,750 Aa	3,00 Aa	3,20 Aa	51,05 Aa	41,63 Aa	0,55 Ab	6,90 Ab	4,33 Ac
R3AE <sup>(1)</sup>	0,12 Ab	2,76 Ab	0,90 Bb	1,72 Ab	1,00 Bc	70,55 Ba	7,45 Bb	1,15 Aa	13,50 Bb	4,60 Ab
R3BE	0,08 Bc	1,61 Bc	0,70 Ab	1,15 Ab	0,40 Ad	60,35 Ba	6,10 Ab	0,55 Ab	13,70 Ab	4,35 Ac
R20AE <sup>(2)</sup>	0,12 Ab	2,71 Ab	0,85 Ab	1,14 Ab	2,05 Bb	84,55 Ba	7,90 Cb	0,60 Bb	32,65 Aa	5,10 Ba
R20BE	0,08 Ac	2,73 Ab	0,85 Bb	1,14 Ab	1,15 Ac	53,15 Aa	5,95 Ab	0,25 Ac	33,40 Aa	4,70 Ab
25 - 50 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,75 Aa	3,00 Ba	3,25 Aa	3,23 Aa	47,68 Ac	26,53 Ba	0,43 ABcd	5,90 Ac	4,15 Ac
R3AE	0,080 Bc	2,37 Ab	1,55 Ab	1,11 Ab	2,05 Ac	281,20 Aa	21,90 Aa	1,30 Aa	19,50 ABb	4,60 Ab
R3BE	0,08 Bc	2,35 Ab	0,60 Ac	1,14 Ab	0,75 Ad	185,00 Aab	7,95 Ab	0,60 Ac	21,75 Aab	4,30 Ac
R20AE	0,12 Ab	2,34 ABb	1,45 Ab	1,71 Ab	2,65 Ab	120,30 ABbc	18,95 ABa	0,90 Ab	28,70 ABab	5,85 Aa
R20BE	0,08 Ac	2,35 Ab	1,50 Ab	1,14 Ab	0,90 Ad	46,35 Ac	5,15 Ab	0,35 Ad	30,15 Aa	4,60 Ab
50 - 75 cm										
Testemunha	1,000 Aa	3,25 Aa	3,75 Aa	3,50 Aa	3,10 Aa	51,73 Ab	20,38 Ba	0,33 Bc	4,90 Ab	4,33 Ac
R3AE	0,12 Ab	1,95 Bb	0,55 Bb	1,14 Ab	1,55 ABb	221,85 Aa	14,45 ABa	0,80 Bb	25,70 Aa	4,60 Ab
R3BE	0,12 Ab	2,41 Ab	0,55 Ab	1,15 Ab	0,80 Ac	199,45 Aa	13,05 Aa	0,70 Ab	23,60 Aa	4,20 Ac
R20AE	0,08 Bc	1,97 Bb	0,45 Bb	1,14 Ab	2,75 Aa	188,50 Aa	17,30 Ba	1,00 Aa	23,45 ABa	5,90 Aa
R20BE	0,08 Ac	1,96 Bb	0,50 Bb	1,14 Ab	1,05 Abc	51,60 Ab	12,70 Aa	0,40 Ac	18,05 Ba	4,55 Ab
75 - 100 cm										
Testemunha	1,00 Aa	3,75 Aa	3,00 Ba	3,25 Aa	3,05 Aa	54,70 Ab	21,83 Ba	0,33 Bbc	6,90 Ab	4,33 Acd
R3AE	0,11 ABb	1,97 Bc	0,75 Bb	1,71 Ab	1,25 Bc	75,25 Bb	13,75 Bb	0,80 Ba	22,50 ABa	4,70 Ab
R3BE	0,08 Bb	2,76 Ab	0,80 Ab	1,70 Ab	0,90 Ac	204,65 Aa	12,60 Ab	0,70 Aa	21,80 Aa	4,20 Ad
R20AE	0,08 Bb	1,96 Bc	0,75 Bb	1,14 Ab	2,40 ABb	185,35 Aa	26,15 Aa	0,50 Bb	22,00 Ba	6,00 Aa
R20BE	0,08 Ab	1,97 Bc	0,80 Bb	1,14 Ab	1,25 Ac	59,50 Ab	6,70 Ab	0,25 Ac	17,05 Bab	4,50 Abc

Obs.: 1-Canal com três anos de uso; 2-Canal com vinte anos de uso.\* Letras iguais, maiúsculas para mesmo tratamento e diferentes profundidades e minúsculas para mesma profundidade e diferentes tratamentos, não diferem significativamente (Tukey, P<0,05) entre si.

Tabela 10. Teores totais de cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre e valores do pH de um Latossolo Vermelho Distrófico na parte interna do reservatório de armazenamento temporário de vinhaça de fertirrigação, em diferentes profundidades, no município de Goianésia, GO<sup>(\*)</sup>.

Tratamento	Cd	Cr	Ni	Pb	Cu	Fe	Mn	Zn	S	pH (CaCl <sub>2</sub> )
	mg dm <sup>-3</sup>									
0 - 50 cm										
R3AD <sup>(1)</sup>	0,10 Aa	1,74 Aa	1,73 Aa	1,42 Aa	2,93 Ab	520,83 Ab	44,00 Aa	10,88 Aa	28,10 Ac	5,48 Ab
R3BD	0,10 Ba	2,15 Aa	0,95 Ab	1,43 Aa	1,03 Ac	353,98 Ab	4,60 Ab	1,60 Ac	11,95 Ac	5,75 Aab
R20AD <sup>(2)</sup>	0,08 Aa	1,53 Aa	1,78 Aa	1,71 Aa	6,45 Aa	932,35 Aa	54,50 ABa	5,93 Ab	148,50 Aa	6,08 Aab
R20BD	0,08 Aa	1,59 Aa	1,65 Aa	1,71 Aa	5,88 Aa	1.173,80 Aa	14,63 Ab	1,15 Ac	72,53 Ab	6,50 Aa
50 - 100 cm										
R3AD	0,12 Aa	1,530 Aa	1,90 Aa	1,15 Aa	2,48 Ab	486,83 Ab	9,50 Bb	4,88 Ba	13,40 Ac	6,00 Aab
R3BD	0,12 Ba	2,170 Aa	0,75 ABb	1,14 Aa	0,85 Ac	271,88 Ab	3,50 Ab	0,78 Aab	9,08 Ac	5,38ABb
R20AD	0,08 Aa	1,54 Aa	1,88 Aa	1,14 Ba	5,40 ABa	977,15 Aa	63,33 Aa	3,33 ABab	123,45 ABa	6,45 Aa
R20BD	0,08 Aa	1,50 Aa	2,00 Aa	1,14 Ba	5,23 Aa	931,35 ABa	4,30 Ab	0,35 Ab	48,90 ABb	6,53 Aa
100 - 150 cm										
R3AD	0,08 Aa	1,30 Ab	1,65 Aa	1,43 Aa	1,85 Ac	297,53 Ab	5,78 Bb	5,20 Ba	12,35 Ac	6,05 Aa
R3BD	0,08 Ba	2,15 Aa	0,63 ABb	1,14 Aa	0,80 Ac	239,43 Ab	4,63 Ab	0,68 Ab	9,40 Ac	4,50 Bb
R20AD	0,12 Aa	1,34 Ab	1,75 Aa	1,14 Ba	4,60 Bb	773,18 Aa	31,70 Ba	1,48 Bab	101,03 Ba	6,53 Aa
R20BD	0,08 Aa	1,39 Aab	1,75 Aa	1,14 Ba	6,03 Aa	658,60 BCa	4,83 Ab	0,28 ABb	51,25 ABb	6,55 Aa
150 - 200 cm										
R3AD	0,08 Ab	1,12 Ab	1,80 Aa	1,14 Aa	1,98 Ab	327,48 Ab	9,60 Bab	8,25 ABa	33,55 Ab	6,10 Aa
R3BD	0,09 Aa	2,35 Aa	0,53 Bb	1,15 Aa	0,48 Ac	342,25 Ab	6,13 Ab	3,10 Ab	7,93 Ab	4,53 Bb
R20AD	0,10 Ab	1,18 Ab	1,68 Aa	1,14 Ba	4,58 Ba	817,45 Aa	31,78 Ba	2,68 ABb	96,00 Ba	6,53 Aa
R20BD	0,08 Ab	1,34 Ab	1,63 Aa	1,14 Ba	5,65 Aa	482,48 Cb	6,55 Ab	0,25 Ab	32,58 Bb	6,63 Aa

Obs.: 1-Canal com três ano de uso; 2-Canal com vinte anos de uso.

\* Letras iguais, maiúsculas para mesmo tratamento e diferentes profundidades e minúsculas para mesma profundidade e diferentes tratamentos, não diferem significativamente (Tukey, P<0,05) entre si.

O tratamento Testemunha apresentou os maiores teores de cádmio, cromo, níquel, chumbo e cobre, em relação aos demais tratamentos, bem como os menores valores de pH em todas as profundidades (Tabela 9). De acordo com Berton (2006), essa maior concentração de metais no tratamento Testemunha pode ser explicada pela solubilidade dos mesmos, que depende fortemente do valor de pH, assim como da forma em que esses se encontram no solo, ou seja, em baixos valores de pH ocorre um aumento na solubilidade de alguns metais, tornando-os altamente disponíveis.

Para o cádmio analisado na parte interna dos reservatórios, as maiores concentrações foram encontradas na camada de 50-100 cm, nos tratamentos R3AD e R3BD. Nos reservatórios com 20 anos de uso não foram observadas diferenças estatísticas significativas para os teores de cádmio entre as camadas de solo avaliadas (Tabela 10).

Não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os teores de cromo, nas diferentes profundidades avaliadas, na parte interna dos reservatórios de vinhaça. Contudo, nas camadas de 100-150 cm e 150-200 cm, os tratamentos com 20 anos apresentaram, em média, menores concentrações desse metal (Tabela 10).

Os teores de níquel observados (Tabela 10), normalmente foram maiores nos tratamentos referentes aos reservatórios de vinhaça com 20 anos de uso, comparativamente com os teores desse elemento nos tratamentos dos reservatórios com três anos. Os menores teores de níquel foram avaliados no tratamento R3BD, em todas as profundidades, comparativamente com os teores obtidos nos demais tratamentos da parte interna dos reservatórios de vinhaça. Constatou-se diferença significativa, neste tratamento, apenas entre os valores de níquel nas camadas de 0-50 cm e 150-200 cm de profundidade (Tabela 10).

Os teores de chumbo foram mais elevados na camada de 0-50 cm de profundidade, em todos os tratamentos, tendo sido maiores nos tratamentos em reservatórios de vinhaça com 20 anos de uso, e que diferiram estatisticamente dos teores obtidos nas camadas externas e inferiores dos reservatórios, e também na Testemunha e nos tratamentos C3E (A e B) na camada de 75-100 cm, evidenciando que o chumbo se acumula no solo nos maiores tempos de uso e nas maiores profundidades (Tabela 10).

De acordo com Silva (1995), os solos tropicais contêm de  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $200 \text{ mg dm}^{-3}$  de chumbo, em condições naturais, sendo um elemento tóxico cumulativo, e pequenas quantidades deste elemento ingeridas aleatoriamente, por si só não causam nenhum dano, podendo tornar-se perigoso se sua ingestão for constante. Souza & Lobato (2004) citam

que o limite máximo aceitável de chumbo no solo é de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ . Teores acima desse valor poderão causar fitotoxicidade a determinadas espécies de plantas. Consta-se que os teores médios de chumbo encontrados na presente pesquisa situam-se dentro dos limites estabelecidos, conforme os referidos autores.

Os tratamentos relativos ao solo da parte interna dos reservatórios de vinhaça com 20 anos de uso apresentaram maiores teores de cobre em todas as profundidades avaliadas, comparativamente com os teores deste elemento nos tratamentos dos reservatórios com três anos (Tabela 10). Esses resultados acompanharam a tendência dos valores de pH, pois, segundo Camargo (1991), o comportamento do cobre é explicado pelo fato de que aumentando os valores do pH do solo, aumenta a adsorção de cobre pelos óxidos de ferro, manganês e alumínio, devido à formação de quelatos.

A disponibilidade de micronutrientes é afetada pela presença de matéria orgânica, textura, minerais de argila, teor de umidade, potencial redox, temperatura, espécie ou concentração dos constituintes da solução do solo, interações com outros nutrientes, velocidade de percolação, e pH do solo, segundo Camargo (1991); Sillanpää (1980); Sposito (1989). Um fator relevante refere-se à adsorção do cobre, o qual faz parte dos elementos químicos aceitos tanto como micronutriente para as plantas como para os animais, com a característica de que, mesmo em concentrações relativamente baixas, pode apresentar toxicidade para ambos, e que pode passar de uma pequena quantidade retida na fase sólida, à adsorção máxima dentro da variação de uma unidade de pH (Ferreira & Cruz, 1991).

Com relação aos teores de ferro (Tabela 9), observou-se que na camada de 0-25 cm do solo situado na parte externa dos reservatórios de vinhaça, estes normalmente foram menores que os das camadas subjacentes. Esse fato permite inferir que há uma tendência de percolação do ferro para as camadas mais profundas do perfil, o que poderia estar relacionado a um processo de dispersão de argilas devido ao excesso de cátions monovalentes fornecido pela vinhaça (Silva et al., 2006).

Assim como observado nos resultados das análises das amostras de solo coletadas na parte externa dos reservatórios temporários, na parte interna destes foram encontrados teores muito elevados de ferro no solo, em especial nos reservatórios com 20 anos, e em todas as profundidades (Tabela 10). Altos teores de ferro, como os observados, podem ser tóxicos às plantas, segundo Camargo (1991).

O manganês é facilmente lixiviado, e isto foi constatado no presente estudo, onde as maiores concentrações foram observadas nos reservatórios com três anos de uso. Foram

constatadas diferenças significativas entre os teores de manganês nos tratamentos dos reservatórios com 20 anos (R20AD e R20BD) em cada nível de profundidade, com valores bem distanciados na parte interna destes (Tabela 10).

Segundo Camargo (1991), a atividade do zinco, na solução do solo, diminui cem vezes para cada unidade de aumento do pH. Essa afirmação explica as menores concentrações de zinco nos reservatórios com 20 anos de uso, onde o pH do meio encontra-se menos ácido. Observando-se a Tabela 10, verifica-se que os teores de zinco acumularam-se no solo sem um padrão regular, considerando o tempo de uso dos reservatórios com vinhaça, com variações acentuadas entre aqueles com o mesmo tempo de uso.

Observa-se, também, que houve considerável lixiviação do enxofre no perfil do solo (Tabela 9), concordando com Lopes (1998). Na parte externa dos reservatórios temporários de vinhaça com três anos de uso, observou-se as menores concentrações de enxofre, nos primeiros 25 cm. Todavia, a análise dos dados relativos aos reservatórios com 20 anos de uso, observou-se que mesmo nas camadas mais profundas do solo houve movimentação de enxofre no perfil.

Analisando-se o solo oriundo da parte interna dos reservatórios de deposição temporária de vinhaça (Tabela 10), observou-se que as concentrações de enxofre nos reservatórios com 20 anos de uso foram superiores às encontradas nos reservatórios com três anos. Evidenciou-se, ainda, que há uma diminuição de seus teores no perfil do solo.

Esses resultados podem ser indicativos da ação de bactérias, pois, segundo Brierley (1991), a comunidade microbiana do solo atua em processos de imobilização, mobilização, transformação de metais por reações de precipitação extracelular, acumulação intracelular, reações de oxidação e redução, metilação e demetilação. A partir dessas reações, as bactérias e os fungos obtêm energia para o desenvolvimento de seus processos vitais (Santini et al., 2000).

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na presente pesquisa permitem concluir que:

- Existe uma interação proporcional e inversa entre o pH e os elementos cobre, ferro, zinco e enxofre, que afeta a disponibilidade destes na solução do solo.
- Os microelementos cádmio, ferro, zinco e cobre se acumularam principalmente nas primeiras camadas do solo.
- O grau de lixiviação dos elementos ferro, cobre e manganês podem não causar danos ao meio ambiente, por seus teores estarem dentro de parâmetros aceitáveis, mesmo nas áreas de influência dos canais e reservatórios de vinhaça com maiores períodos de uso.
- A lixiviação e o acúmulo de diferentes metais pesados no solo das áreas de influência de canais e de reservatórios de vinhaça, resultante da presença de grande volume desse resíduo por longos períodos, sinalizam a necessidade desses canais e reservatórios serem revestidos com material impermeabilizante, como cautela ambiental.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor sucroalcooleiro está se transformando em um dos ramos mais promissores do agronegócio brasileiro. Um exemplo disso é o reflexo do desenvolvimento de motores automotivos bicomustíveis (combustão de gasolina e álcool). A coogeração de energia utilizando o bagaço da cana-de-açúcar também tem sido mais uma alternativa viável para o suprimento de energia renovável. Esse cenário favorável tem provocado a expansão acentuada dessa cultura, principalmente em áreas da região Centro-Sul do país, notadamente o oeste paulista, triângulo mineiro, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás.

Contudo, apesar desse quadro promissor no mercado brasileiro e pelo fato do Brasil ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, existem grandes desafios a serem superados: a geração de tecnologias aprimoradas; formação e qualificação da mão-de-obra; planejamento para o ajuste entre a oferta e a demanda; investimentos em logística e, programas de melhoramento genético.

As questões ambientais, tais como a degradação de ecossistemas e a poluição atmosférica causada pelas queimadas, poluição de cursos d'água e do lençol freático causado pela aplicação excessiva da vinhaça na forma de fertirrigação, preservação das reservas permanentes e manutenção de corredores ecológicos; tratamento dos resíduos oriundos do processamento da cana-de-açúcar, dentre muitas outras, devem ser prioritariamente discutidas, para que a sustentabilidade e a produtividade obtida nos canaviais brasileiros se tornem aliadas, sobretudo, em áreas de expansão da cultura, onde nem sempre as condições de cultivo são as melhores, principalmente por serem conduzidos em solos menos férteis e com deficiência hídrica.

Nesse contexto, juntamente com os componentes tecnológicos fundamentais para a sustentação do setor sucroalcooleiro, deverão ser incorporados estudos de impacto ambiental deste setor produtivo na região em que se encontra inserido, através do desenvolvimento de novas tecnologias adaptadas às condições específicas de cultivo, manejo, processamento da matéria-prima e aproveitamento dos resíduos gerados. De maneira geral, essas ações deverão impactar positivamente o setor sucroalcooleiro em Goiás, pois, até o momento, a maioria das tecnologias aplicadas para a cultura da cana-de-

açúcar no Estado e mesmo na Região Centro-Oeste, têm sido derivadas e adaptadas de programas desenvolvidos em outras regiões do País.

Experiências bem sucedidas na destinação de resíduos das usinas e destilarias produtoras de açúcar e álcool praticadas pelo setor sucroalcooleiro. Porém, ainda se faz necessária a preocupação com o impacto ambiental causado pelas formas de disposição da vinhaça, em todas as fases após sua saída do processo de moagem. Assim como, a identificação e implementação de novas possibilidades de utilização dos resíduos industriais nos demais sistemas de produção, o que evidencia a necessidade da criação de programas específicos, fomentando novas pesquisas, aperfeiçoamento e adequação dos recursos humanos para que se possa superar os novos desafios da gestão sucroalcooleira, considerando os aspectos econômicos, ecológicos e sociais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em ciência do solo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 1, p. 299-352, 2000.
- ALBERICI, T. M.; SOPPER, W. E.; STORM, G. L.; YAHNER, R. H. Trace metals in soil, vegetation, and voles from mine land treated with sewage sludge. **Journal Environment Quality**, v.18, p. 115-120, 1989.
- ALMEIDA, J. R. O problema da vinhaça. **O Brasil açucareiro**. v. 46, n.2, p. 72-77, 1995.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, C.; VELLOSO, A. C. X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p. 271-276, 1992.
- ASHWOTTH, D. J.; ALLOWAY, B. J. Soil mobility of sewage sludge-derived dissolved organic mater, copper, nickel and zinc. **Environment Pollution**, v.127, p. 137-144, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Resíduos sólidos: classificação**. NBR 10.004. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2004. 71p.
- BARCELÓ, J. C.; POSCHENRIEDER, C. Respuesta de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelo y Planta**, v. 2, p. 345-361. 1992
- BATAGLIA, O. C. Micronutrientes: disponibilidade e interações. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo, 17., 1988, Londrina. **Anais ... Londrina: SBCS**, 1988. 234p.
- BERTON R. S. Risco de contaminação de agroecossistemas com metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Lodo de esgoto: Impacto ambiental do uso agrícola**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006, 349 p.
- BORGES, J. D. **Efeitos do lodo de curtume nas culturas do milho (*Zea mays* L.) e do capim braquiário [*Brachiaria brizantha* (HOCHST EX A. RICK) Stapf.] cultivar marandú em Latossolo Vermelho-Amarelo**. Goiânia, 2003. 244 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Divisão de Corretivos e Fertilizantes. Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes e corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. **Legislação**. Brasília, 1983, 104 p.

BRIERLEY, C. L. Bioremediation of metal-contaminated surface and groundwaters. **Geomicrobiology Journal**. v. 8, p. 201-233, 1991.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCRACKEN, R. J.; SOUTHARD, R. J. **Soil genesis and classification**. Iowa: Iowa State University Press, 1997. 527 p.

CAMARGO, O. A. Reações e interações de micronutrientes no solo. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafós/CNPq, 1991. p. 243-272.

CATALÁ, R.; MONTORO, R.; IBÁÑEZ, N. Contaminación por metales pesados de los productos cárnicos. **Revista Agroquímica de las Tecnologías Alimenticias**, v.23, n.2, p. 202-216, 1983.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar safra 2007/2008, terceiro levantamento- Novembro/2007**. Brasília: Conab, 2007. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/11levan\\_cana07.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/11levan_cana07.pdf)> Acesso em: 23 de março de 2008. 13 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA/IBAMA. Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986. In: Diário Oficial da União. Distrito Federal, jul. 1986.

CORAZZA, R. I. Reflexões sobre o papel das políticas ambientais e de ciência e tecnologia na modelagem de opções produtivas “mais limpas” numa perspectiva evolucionista: um estudo sobre o problema da disposição da vinhaça In: ENCONTRO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 3. Recife: SBEE, nov. 1999. **Anais ... JEL:Q 38**.

COSTA, L. M.; OLIVEIRA, T. S. Metais pesados em solos de uma topossequência do triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 28, p. 785-796, 2004.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society Brazilian**. v. 51, p. 153-158, 1997.

DEMATTE, J. L. I. O uso agronômico de resíduos X fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar. Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 20, Piracicaba, 1992. **Anais...** Campinas: Fundação Cargil, 1992. p. 213-251.

DORST, J. **Antes que a natureza morra**: por uma ecologia política. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 394 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997, 212 p.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1999, 412 p.
- FADIGAS, F. S.; AMARAL-SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C.; FREIXO, A. A. **Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros**. *Bragantia*, v. 61, n. 2, p. 151-159, 2002.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1994. 227 p.
- FASSBENDER, H. W. **Química de suelos com énfasis em suelos de América Latina**. San José: Matilde de la Cruz, 1980. 398 p.
- FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. 2ª ed. Curitiba: Sanepar, Finep, 2001.
- FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Ed.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafós/CNPq, v.1, 1991, p.131-157.
- FREIRE, J. W., CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203 p.
- GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação de vinhaça como fertilizante**. 1ª ed. São Paulo: Coopersucar, 1983. 38 p.
- GOMES, P. C.; PEREIRA, P. R. G.; ALVAREZ, V. H. Absorção e translocação de metais pesados em plantas de alface em latossolo vermelho-amarelo húmico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília. **Resumos ...** Brasília: SBSCS, 1999. 1 CD-ROM.
- HARMSSEN, K.; VLEK, P. L. G. The chemistry of micronutrients cations in a group of loessial grassland soils of New Zealand. *Geoderma*, v. 83, p. 53-62, 1985.
- HOFFMANN, G.; SCHWEIGER, P. **Cd- and Pb- contents of vegetables grown on soils of former vineyards treated with municipal waste-compost**. *Act. Hort.*, v. 133, p. 173-179, 1983.
- HUE, N. V., RANJITH, S. A. Sewage sludges in Hawaii: chemical composition and reactions with soils and plants. *Water, Air and Soil Pollution*, v.72, p. 265-283, 1994.
- JARAUSCH-WEHRHEIM, B.; MOCQUOT, B; MENCH, M. **Absorption and translocation of sludge-borne zinc in field-grown maize (*Zea mays* L.)**. *European Journal Agronomy*, Amsterdam, v.11, n.1, p. 23-33, 1999.
- JONES, L. H. P.; JARVIS, S. C. The fate of heavy metals. In: GREENLAND, D. J.; HAYERS, M. H. B. (Eds.). **The chemistry of soil process**. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1981. p. 593-620.
- KABATA-PENDIAS, A., PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca raton: CRR Press, 1987. 315p.

KIEL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba: Ceres, 1985. 492 p.

LAMBAIS, M. R. Poluição orgânica e seu controle. In: CARDOSO, E. J. B. N; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (Coords.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 91-104.

LEITE, S. L. C. **Adição de resíduo de curtume ao solo e absorção de cromo por plantas**. 1982. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, Brasília, 1982.

LOPES, A. S. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. 2ª ed. Piracicaba: Potafós, 1998. 177 p.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental**. São Paulo: Produquímica, 1994, 153 p.

MALAVOLTA, E., CAMARGO, S. M., ANJOS, A. R. M., ROSSI, C. Adubação fosfatada e metais pesados em latossolo cultivado com arroz. **Scientia Agrícola**, v. 57, n.3, p.513-518, jul./set. 2000.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1989. 201 p.

MARINHO, M.L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Efeito do cobre e do zinco na produção da cana-de-açúcar em solos de tabuleiros de Alagoas. **Brasil Açucareiro**, v. 98, p. 41-50, 1981.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic Press, 1986. 674 p.

MATTIAZZO, M. E. Química Ambiental e Agronomia. In: Adubação, produtividade e ecologia; **Simpósios**. Dechen, A. R. (Coord.), Campinas: Fundação Cargil, p.157-178, 1992.

MATTIAZZO, M. E.; BERTON, R. S.; CRUZ, M. C. P. Disponibilidade e avaliação de metais pesados potencialmente tóxicos. In: FERREIRA, M. E. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/Fapesp/Potafós, 2001. 599 p.

McBRIDE, M. B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? **Journal of Environmental Quality**, v. 24, p. 5-18, 1995.

MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis. 2000, 174 p.

MOOLENAAR, S. W., BELTRANI, P. Heavy metals in environment. Heavy metal blances of italian soil as affect by sewage sludge and Bourdeaux misture applications. **Journal of Environmental Quality**, v.27, p. 828-835, 1998.

OLIVEIRA, A. C. S. **Acúmulo de micronutrientes e de elementos tóxicos em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça**. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CRUZ, C. D.; HORN, H. A. Metais pesados como indicadores de materiais de origem em uma topolitoseqüência do Triângulo Mineiro, Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n. 8, p.1451-1465, 1999.

ORLANDO FILHO, J. Cana-de-açúcar. In: **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/Fapesp/Potafós, p. 355-372, 2001.

OSSANAI, J. Efeitos dos metais pesados na saúde. In: Seminário sobre Poluição por Metais Pesados, 1., 1980, Brasília. **Resumos ...** Brasília: UnB, 1980. 252 p.

PETRUZZELLI, G., LUBRANO, L., PETRONIO, B. M., GENNARO, M. C., VANNI, A., LIBERATORI, A. Soil sorption of heavy metals as influenced by sewage sludge addition. **Journal of Environment Science and Health, Part A: Environment Science and Engineering**, v. 29, p. 31-50, 1994.

PIRES, A. M. M.; MATTIAZZO, M. E.; GUILHERMEL, R. G.; MARCHI, G. **Extração de metais pesados fitodisponíveis em solos tratados com lodo de esgoto: uso de ácidos orgânicos**. Comunicado Técnico 28, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005.

PÓLO, A., ANDREAUX, F., CERRI, C. C., LOBO, M. C. Resíduos orgânicos da agroindústria canavieira: 2. Decomposição biológica sob condições controladas. **STAB, Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.6, n.3, p.53-56, 1998.

PROCANA. **Cana muda eixo da economia no Centro-Oeste**. Disponível em: <[www.jornaldacana.com.br/conteudo/noticia.asp](http://www.jornaldacana.com.br/conteudo/noticia.asp)>. Acesso em 15 de junho de 2008.

RAMALHO, J. F. G. P. **Metais pesados em solos com diferentes usos agrícolas no estado do Rio de Janeiro**. 1996. 143 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1996.

RAMALHO, J. F. G.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X. Acúmulo de metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso contínuo de adubação fosfatada e água de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 971-979, 1999.

RODELLA, A. A., FERRARI, S. E. A composição da vinhaça e efeitos de sua aplicação como fertilizante na cana-de-açúcar. **BRASIL AÇUCAREIRO**, Rio de Janeiro, v. 90, n.1, p. 380-389. **Anais...** p. 243-256, 1997.

ROSS, S. M. Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. In: ROSS, S. M. ed: **Toxic metals in soil plants systems**. New York: John Wiley & Sons. p. 63-151, 1994.

ROSSETTO, A. J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S. B. (Eds.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. 1ª ed. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 435-504.

SANCHEZ, P. A. Fertilizers make continuous cropping possible in the Amazon. **Better Crops International**, v. 1, p. 12-33, 1985.

SANTINI, J. M.; BASSO, C.; WILMS, F. W. W. A new chemolithoautotrophic arsenite-oxidizing bacterium isolated from a gold-mine: phylogenetic, physiological, and preliminary biochemical studies. **Applied Environment Microbiology**. v. 66, p. 92-97, 2000.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SCHMITT, H. W.; STICHER, H. **Heavy metal compounds in the soil**. 1991. p. 311-331.

SILLANPÄÄ, M. Problems involved in estimating the micronutrient status of soils. In: FAO (Ed.). **Soil and plant testing and analysis**. Roma: FAO, 1980, v. 38/1, p.140-151.

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 291-299, 1998.

SILVA, F. C. **Uso agrônômico de “resíduo orgânico”: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar**. 1995. 170 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ. Piracicaba, 1995.

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

SILVA, M. A. S.; SOARES, R. A. B.; PIVETA, T. G.; BORGES, J. D.; KLIEMANN, H. J. Uso de vinhaça na fertirrigação de cana-de-açúcar e seus impactos sobre as características da água. In: **III CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 2006**, Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006. 4 p. 1 CD-ROM.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR DO ESTADO DE GOIÁS-SIFAEG. **Levantamento sistemático da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de Goiás, safra 2007/08**. Disponível em: <<http://www.sifaeg.com.br>>. Acesso em 23 de março de 2008.

SOBRAL, F. A.; WEBER, H. Nutrição mineral da cana-de-açúcar (micronutrientes). In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, IAA: Planalsucar, p. 103-122, 1983.

SOUZA, D. M.; LOBATO, E. **Cerrado: correção e adubação**. 2ª ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.

TIVERON FILHO, D. **Apostila da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2000. 152 p.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**. Boulder: Westview Press, 1981. 170 p.



USINA ESTER, S. A. **O Processo de fabricação de Açúcar e Álcool na Usina Ester.** 2007. Disponível em: <<http://www.usinaester.com.br/Produtos/produtos.html>.> Acessado em: 15 de junho de 2008.

VELUCHAMY, M.; MUTHUKRISHMAN, A.; SIVARAMAN, S.; VIJAYARAM, M. Influence of zinc and iron micronutrients on yield and quality of sugarcane. **Fertilizer News**, v. 39, p. 39-41, 1994.

WILLIAMS, D. E. Metal movement in sludge-amended soils: a nine-year study. **Soil Science**, v. 143, p. 124-131, 1987.

WITTMANN, G. T. W. Toxic metals. In: FORSTNER, V.; WITTMANN, G. T. W. (Eds.). **Metal pollution in the aquatic environment.** 2<sup>a</sup> ed. Berlin: Springer-Verlag, v. B, 1981. p. 3-70.

ZURERA, G.; ESTRADA, B.; RINCON, F.; POZO, R. Lead and cadmium contamination levels in edible vegetables. **Pollution Environment Contamination Toxicologic**, v. 38, p. 805-812, 1987.

## **8 ANEXOS**

**Anexo 1.** Matriz de correlação entre as variáveis pH, cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre, analisados entre si. Dados obtidos das análises de solo amostradas dos canais de transporte de vinhaça. Goianésia, GO.

Parâmetros	pH	Cádmio	Cromo	Níquel	Chumbo	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco	Enxofre
pH	1,00000									
Cádmio	0,06164 <sup>ns</sup>	1,00000								
Cromo	0,10622 <sup>ns</sup>	0,46059**	1,00000							
Níquel	0,05527 <sup>ns</sup>	0,85653**	0,34292**	1,00000						
Chumbo	0,04492 <sup>ns</sup>	0,93407**	0,39696**	0,83997**	1,00000					
Cobre	0,39211**	-0,14917 <sup>ns</sup>	0,12113 <sup>ns</sup>	-0,14859 <sup>ns</sup>	-0,19940*	1,00000				
Ferro	0,22993*	-0,21072*	0,22502*	-0,21468*	-0,24767**	0,63896**	1,00000			
Manganês	0,16014 <sup>ns</sup>	0,46525**	0,32248**	0,34912**	0,44634**	-0,00880 <sup>ns</sup>	0,07375 <sup>ns</sup>	1,00000		
Zinco	0,20058*	-0,13126 <sup>ns</sup>	0,23730*	-0,15188 <sup>ns</sup>	-0,18107*	0,82297**	0,54159**	0,11462 <sup>ns</sup>	1,00000	
Enxofre	0,27825**	-0,48128**	-0,12073 <sup>ns</sup>	-0,45508**	-0,45780**	0,44545**	0,54645**	-0,07825 <sup>ns</sup>	0,33220**	1,00000

**Anexo 2.** Matriz de correlação entre as variáveis pH, cádmio, cromo, níquel, chumbo, cobre, ferro, manganês, zinco e enxofre, analisados entre si. Dados obtidos das análises de solos amostradas nos reservatórios temporários de vinhaça. Goianésia, GO.

Parâmetros	pH	Cádmio	Cromo	Níquel	Chumbo	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco	Enxofre
pH	1,00000									
Cádmio	-0,11697 <sup>ns</sup>	1,00000								
Cromo	-0,32034**	0,03995 <sup>ns</sup>	1,00000							
Níquel	0,19236*	0,12446 <sup>ns</sup>	0,21258*	1,00000						
Chumbo	-0,09981 <sup>ns</sup>	0,76452*	0,42845**	0,76452 <sup>ns</sup>	1,00000					
Cobre	0,71734**	-0,13675 <sup>ns</sup>	-0,41791**	0,10850 <sup>ns</sup>	-0,14811 <sup>ns</sup>	1,00000				
Ferro	0,56050**	-0,11697 <sup>ns</sup>	-0,41124**	0,00937 <sup>ns</sup>	-0,22768**	0,75677**	1,00000			
Manganês	0,24738**	-0,02316 <sup>ns</sup>	0,04509 <sup>ns</sup>	0,23502**	0,17331*	0,38914**	0,31026**	1,00000		
Zinco	0,27795**	-0,06534 <sup>ns</sup>	-0,21845**	0,01828 <sup>ns</sup>	-0,08564 <sup>ns</sup>	0,24725**	0,31242**	0,20628*	1,00000	
Enxofre	0,35029**	-0,10973 <sup>ns</sup>	-0,33267**	-0,02660 <sup>ns</sup>	-0,18161*	0,63795**	0,73265**	0,33225**	0,20978*	1,00000