

HELDER ANTONIO DE AQUINO GARIGLIO

**ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS E MOBILIDADE DE SOLUTOS  
EM SOLOS SUBMETIDOS À APLICAÇÃO DE VINHAÇA  
PROVENIENTE DA FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL CARBURANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2008

HELDER ANTONIO DE AQUINO GARIGLIO

**ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS E MOBILIDADE DE SOLUTOS  
EM SOLOS SUBMETIDOS À APLICAÇÃO DE VINHAÇA  
PROVENIENTE DA FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL CARBURANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de setembro de 2008.

---

Maria Aparecida Nogueira Sediama

---

Júlio César Lima Neves

---

Alisson Carraro Borges

---

Walter Antonio Pereira Abrahão  
(Co-orientador)

---

Antonio Teixeira de Matos  
(Orientador)

“Que condições, senão as físicas e químicas, de solo e de clima, determinam o caráter da vegetação espontânea e as possibilidades da agrícola, e através desse caráter e dessas possibilidades, o caráter e as possibilidades do homem?”  
(Gilberto Freyre)

À minha esposa Soraya, meus filhos Ana Clara e Túlio.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e aos espíritos de luz que tem me acompanhado.

À minha esposa Soraya e aos meus filhos Ana Clara e Túlio, pelo amor, carinho e paciência em todos os momentos.

Aos meus pais João (*in memoriam*) e Maria Isabel, pelo amor, dedicação e ensinamentos.

À Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais, pelo incentivo e pelas condições proporcionadas à realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Antonio Teixeira de Matos, pela confiança, orientação, amizade e pelo exemplo de profissionalismo.

Aos meus co-orientadores, professores Liovando Marciano da Costa, Paulo Afonso Ferreira e Walter Antonio Pereira Abrahão, pela paciência, disponibilidade e pelas valiosas sugestões.

Ao professor Fabyano Fonseca, pela paciência e disponibilidade.

Aos amigos Admilson Costa, Débora Astoni, Renata, Kellis Regina, José Antonio Souza e Regina Andrade, pelos momentos que passamos juntos, pelo apoio e contribuição no desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos da FEAM, Rosângela Gurgel, Márcia Romanelli, Luiz Gonzaga e Liliana Mateus pelo apoio e solidariedade.

Aos laboratoristas Simão, Cláudio, Carlinhos e Alyson por sua colaboração na realização das análises.

Aos estagiários Almerindo Mendes, Camila Foly, Rafael e Suymara Toledo, pela dedicação e colaboração durante a montagem, coleta de dados e análises em laboratório.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial à Edna e ao Renato, pelas extraordinárias atenção e disponibilidade.

## **BIOGRAFIA**

HELDER ANTONIO DE AQUINO GARIGLIO, filho de João Gariglio e Maria Isabel de Aquino Gariglio, nasceu em Ponte Nova, MG, em 28 de setembro de 1957.

Em julho de 1988, graduou-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Em maio de 2006, ingressou no Programa de mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, concentrando seus estudos na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em 12 de setembro de 2008.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. A atividade canavieira no Brasil .....	4
2.2. Fabricação de açúcar e álcool e os impactos ambientais associados .....	6
2.3. Disposição de águas residuárias no solo .....	9
2.3.1. Fertirrigação de culturas agrícolas com vinhaça .....	11
2.4. Legislação relativa à disposição de vinhaça no solo .....	16
2.5. Aspectos importantes a serem considerados para adequada definição de doses de vinhaça a serem dispostas no solo .....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	22



	Página
3.1. Experimento de incubação de amostras de solos submetidas a diferentes doses de vinhaça .....	25
3.2. Ensaio em colunas de lixiviação .....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
4.1. Caracterização da vinhaça de caldo misto .....	29
4.2. Alterações físicas e químicas em solos submetidos a diferentes doses de vinhaça proveniente da fabricação de álcool carburante .....	30
4.2.1. Matéria orgânica e nitrogênio total .....	30
4.2.2. Potássio .....	32
4.2.3. Cálcio e magnésio .....	37
4.2.4. Sódio .....	40
4.2.5. pH .....	41
4.2.6. Condutividade elétrica .....	43
4.2.7. Acidez trocável .....	44
4.2.8. Acidez potencial .....	45
4.2.9. Capacidade de troca catiônica potencial .....	45
4.2.10. Capacidade de troca catiônica efetiva .....	46
4.2.11. Argila dispersa em água .....	47
4.2.12. Capacidade de campo .....	48
4.3. Curvas de efluentes para potássio, cálcio e magnésio dos solos .....	49
5. CONCLUSÕES .....	57
REFERÊNCIAS .....	59
APÊNDICE .....	66

## LISTA DE QUADROS

		Página
1	Características físicas e químicas de vinhaças geradas a partir de três fontes .....	9
2	Características da vinhaça utilizada no experimento .....	23
3	Características físicas e análise textural dos solos utilizados no experimento .....	24
4	Características químicas iniciais dos solos utilizados no experimento .....	24
5	Teores dos minerais da fração argila dos latossolos utilizados nos experimentos (em %) .....	25
6	Valores médios de conteúdo de matéria orgânica nos solos submetidos à aplicação de diferentes doses de vinhaça .....	30
7	Valores médios de concentração de nitrogênio total nos solos submetidos à aplicação de diferentes doses de vinhaça .....	31
8	Médias das concentrações de potássio trocável nos solos submetidos à aplicação de vinhaça .....	33
9	Médias das concentrações de Ca+Mg trocáveis nos solos submetidos à aplicação de vinhaça .....	38
10	Médias das concentrações de sódio trocável nos solos submetidos à aplicação de vinhaça .....	41

	Página
11	Médias dos índices de pH em água e em KCl nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 42
12	Médias da condutividade elétrica nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 43
13	Médias da acidez trocável nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 44
14	Médias da acidez potencial nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 45
15	Médias da CTC potencial nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 46
16	Médias da CTC efetiva dos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 47
17	Médias da porcentagem de argila dispersa nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 48
18	Médias das capacidades de campo nos solos submetidos à aplicação de vinhaça ..... 49
19	Características obtidas no ensaio de deslocamento miscível utilizando vinhaça aplicada em colunas de solos, em condições de laboratório ..... 49
20	Valores médios do fator de retardamento (fR) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) dos íons potássio, cálcio e magnésio . 54
1A	Resumo da ANOVA ..... 67

## LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Índice de saturação de potássio no solo LVef em função de doses aplicadas de vinhaça .....	34
2 Índice de saturação de potássio no solo LVAd em função de doses aplicadas de vinhaça .....	35
3 Índice de saturação de potássio no solo LVd em função de doses aplicadas de vinhaça .....	35
4 Índice de saturação de Ca+Mg no solo LVAd em função de doses aplicadas de vinhaça .....	39
5 Índice de saturação de Ca+Mg no solo LVd em função de doses aplicadas de vinhaça .....	39
6 Índice de saturação de Ca+Mg no solo LVef em função de doses aplicadas de vinhaça .....	40
7 Curva de efluente para concentração de cálcio no LVef .....	50
8 Curva de efluente para concentração de potássio no LVef .....	50
9 Curva de efluente para concentração de magnésio no LVef ...	51
10 Curva de efluente para concentração de cálcio no LVAd .....	51
11 Curva de efluente para concentração de potássio no LVAd ...	52

		Página
12	Curva de efluente para concentração de magnésio no LVAd .	52
13	Curva de efluente para concentração de cálcio no LVd .....	53
14	Curva de efluente para concentração de potássio no LVd .....	53
15	Curva de efluente para concentração de magnésio no LVd ....	54

## RESUMO

GARIGLIO, Helder Antonio de Aquino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2008. **Alterações físicas e químicas e mobilidade de solutos em solos submetidos à aplicação de vinhaça proveniente da fabricação de álcool carburante.** Orientador: Antonio Teixeira de Matos. Co-orientadores: Walter Antonio Pereira Abrahão, Paulo Afonso Ferreira e Liovando Marciano da Costa.

A vinhaça é um dos principais resíduos da fabricação do álcool e da aguardente, apresentando pH ácido, alta temperatura e elevadas concentrações de potássio e matéria orgânica, sendo gerada numa proporção de 10 e 15 litros para cada litro de álcool produzido, e 5 a 6 litros, no caso da produção de aguardente. A prática da fertirrigação com vinhaça requer cuidados devido à possibilidade de ocorrerem alterações físicas e químicas nos solos, assim como contaminação de águas subterrâneas, advindas da aplicação de doses inadequadas dessa água residuária. Neste trabalho, composto por dois experimentos, teve-se como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de vinhaça nas características físicas e químicas de solos de três classes representativas das áreas de produção de cana-de-açúcar, no estado de Minas Gerais. O primeiro experimento, que obedeceu ao delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, no esquema fatorial 3x5 (três classes de solo e cinco doses de vinhaça), foi conduzido em casa de

vegetação, anexa ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Em amostras dos solos LVd, LVef e LVAd (mantidas em recipientes de 2 litros) foram aplicadas as doses correspondentes a 0, 40, 80, 160 e 320 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> de vinhaça. O material ficou incubado durante 20 dias e, após, foram retiradas amostras para realização de análises químicas de avaliação de fertilidade (K, Na, Ca, Mg, N<sub>T</sub>, Al<sup>3+</sup>, H+Al, CTC<sub>efet.</sub>, CTC<sub>pH7.</sub>, matéria orgânica e pH) e físicas (condutividade elétrica, capacidade de retenção de água e de argila dispersa em água). No segundo experimento, realizado no Laboratório de Solos e Resíduos Sólidos do DEA/UFV, colunas das três classes de solos foram utilizadas para a determinação dos parâmetros de transporte do K, Ca e Mg, tendo sido determinados os fatores de retardamento e coeficientes dispersivo-difusivo mediante o programa computacional DISP. Concluiu-se, do primeiro experimento, que a aplicação da vinhaça proporcionou alterações nas variáveis analisadas, à exceção da MO e N<sub>T</sub>, sendo que, com base nos valores obtidos, verificou-se crescente e significativa ocupação dos sítios de troca do solo por potássio, em todos os solos. Nos ensaios realizados em colunas de lixiviação, verificou-se grande deslocamento do magnésio presente no solo pelo potássio aplicado, via vinhaça. Com base nos resultados obtidos, recomenda-se reavaliação da Deliberação Normativa COPAM n.º 012/86, relativa ao assunto, vigente no estado de Minas Gerais, tendo em vista que existe grande risco para a qualidade do solo e das águas subterrâneas, a persistirem as doses de aplicação máximas permitidas pela mencionada Deliberação.

## ABSTRACT

GARIGLIO, Helder Antonio de Aquino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2008. **Physical and chemical changes and mobility of solutes in soils undergoing the implementation of vinasse.** Adviser: Antonio Teixeira de Matos. Co-advisers: Walter Antonio Pereira Abrahão, Paulo Afonso Ferreira e Liovando Marciano da Costa.

Vinasse is one of the prime residues from alcohol and sugarcane rum production and it shows acid PH, high temperature and raised high concentration of potassium and organic matter, being generated in a proportion of 10 and 15 L to each liter of alcohol production, and 5 to 6 L in the production of sugarcane rum. The experience of vinasse fertirrigation demands caution due to the possible occurrences of physical and chemical changes in the soils, as well as of contamination of the underground water, both resulting from the inadequate dosages of such wastewater. The aim of this work, composed of two experiments, was to evaluate the effects of vinasse usage in the physical and chemical properties of three soil categories representing the areas of sugarcane production in the state of Minas Gerais - Brasil. The first experiment, which followed a completely randomized design, repeated three times in the factorial scheme 3x5 (three soil categories and 5 vinasse dosages), was performed at the vegetation house adjoining the Laboratory of Hydraulics of the



Department of Agricultural Engineering - DEA/UFV. Vinasse dosages of 0, 40, 80, 160 and 320 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> were applied to samples of the soils LVd, LVef e LVAad kept in 2L containers. From this material, which was held for 20 days in incubation, samples were later removed to be subjected to chemical analyses (K, Na, Ca, Mg, NT, Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>Al, CTCefet, CTCpH7, organic matter content, values of the PH), as well as to physical analyses (electric conduction, water-retaining power and water-dispersed clay). For the second experiment, performed at the Laboratory of Soils and Solid Residues of DEA/UFV, columns of the three soils were used to determine the drifting parameters of the K, Ca and Mg in the same soils, having the retardation factors and the dispersion-diffusion coefficients been determined by the computational program DISP. It follows that the use of vinasse presented changes in the analysed variables, with the exception of the MO and NT, seeing that based upon the acquired values, a growing and significant potassium occupation of the soil exchange sites in all soils could be certified. The assays performed in the percolation columns testified the great displacement of the magnesium belonging to the soil, this displacement being achieved by the usage of potassium via vinasse. Based upon the final results, we can recommend the reevaluation of the current environmental legislation of Minas Gerais, in what pertains to this subject, attention being kept on the great risk offered by the dosage therein established.

## 1. INTRODUÇÃO

Para melhor entendimento dos fenômenos ambientais, é de fundamental importância sempre raciocinar com base nos ciclos biogeoquímicos, ou seja, as ocorrências devem ser sempre interpretadas considerando-se os fluxos de matéria e energia, os quais ocorrem dinamicamente entre os três grandes compartimentos reguladores: litosfera, hidrosfera e atmosfera (ROCHA et al., 2004).

Desde que o homem começou a colher grãos silvestres, algumas sementes caídas pelo caminho germinaram e lhe deram idéias de como obter a produção do solo, a percepção da necessidade da provisão para o futuro (DURANT, 1957), a agricultura se desenvolveu e vem se desenvolvendo para atender necessidades impostas pela humanidade, muito além daquelas básicas e essenciais para a sua sobrevivência.

Como consequência do consumismo contemporâneo ocorre escassez de recursos naturais renováveis e aumento na demanda de energia. As implicações ambientais disso têm estimulado pesquisas e desenvolvimento de tecnologias alternativas de suprimento energético. A conversão da biomassa em energia vem tomando, cada vez mais, espaço no contexto das alternativas viáveis. Nesse sentido, a produção de álcool no Brasil vem se firmando como alternativa de substituição de combustíveis fósseis, satisfazendo as necessidades da frota de veículos movida a álcool hidratado e o consumo de álcool anidro no mercado interno e externo (GRANATO, 2003).

A indústria sucroalcooleira, principalmente a de produção de álcool carburante, tem sido apresentada como atividade que contribui para a melhoria do meio ambiente, quando são realçados aspectos como a produção de combustível mais limpo, a co-geração de energia elétrica e, mais recentemente, o seqüestro de carbono. Contudo, há que se destacarem os impactos ambientais causados por tal atividade quando desenvolvida sem os devidos cuidados técnicos no controle, tratamento e disposição dos poluentes gerados.

Embora o controle ambiental dos empreendimentos do setor sucroalcooleiro venha evoluindo ao longo dos anos, permanece como principal foco de atenção o gerenciamento das suas águas residuárias, principalmente a vinhaça, tanto pelos grandes volumes gerados quanto pelo potencial poluidor desses efluentes.

A presença desse efluente em corpos hídricos pode causar depleção nos níveis do oxigênio dissolvido, criando condições adversas à sobrevivência da biota aquática, uma vez que, para degradar a matéria orgânica afluyente, há consumo de oxigênio pelas bactérias aeróbias para oxidação do material orgânico presente (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM, 2003; VON SPERLING, 2005).

O potencial poluidor da atividade de produção de álcool carburante, no Estado de Minas Gerais, em termos de carga orgânica, corresponde à do esgoto sanitário, produzido diariamente por uma população equivalente a, aproximadamente, 40 milhões de pessoas. Se for acrescentada a esse valor a contribuição advinda dos alambiques de cachaça, estimados em mais de 8.000 unidades em todo o Estado (OLIVEIRA, 2005), tem-se uma carga orgânica equivalente a, aproximadamente, 44 milhões de habitantes.

Diante desse quadro, há que se reconhecer que a adoção da fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar com vinhaça e demais águas residuárias, além de suprir parte das necessidades nutricionais da planta, soluciona grave problema de poluição hídrica, de forma mais imediata, quando evita o lançamento desses efluentes em águas superficiais, mas reitera-se que se essa água residuária for aplicada de forma descontrolada pode causar sérios impactos ambientais nos solos e contaminação de águas subterrâneas.

Assim, nesse contexto, este trabalho objetivou avaliar os efeitos advindos da aplicação de vinhaça em características químicas e físicas de solos de três classes e servir de subsídios para uma possível revisão da Legislação que regulamenta o controle ambiental da atividade sucroalcooleira no estado de Minas Gerais, considerando que existe grande risco para a qualidade do solo e das águas subterrâneas, a persistirem as doses de aplicação de vinhaça permitidas pela mencionada deliberação.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. A atividade canavieira no Brasil

A cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.), introduzida no Brasil em 1532, na capitania de São Vicente, por Martim Afonso de Souza, tem proporcionado relevantes contribuições econômicas e sociais ao Brasil, sendo os séculos XVI e XVII considerados o período coincidente com o segundo grande ciclo da história econômica do país (CARDOSO, 2001). O processamento dessa matéria-prima pode destinar-se à obtenção de vários produtos, destacando-se o açúcar, o álcool, a aguardente e a rapadura (BANCO DO NORDESTE – BDN, 1999).

O cultivo da cana-de-açúcar, no Brasil, passou por grande expansão no século XVII, devido à presença dos holandeses que elevaram nossa produção de açúcar, vindo a experimentar declínio no século XVIII, devido à concorrência, no mercado europeu, do açúcar produzido no Suriname e nas Antilhas, tendo passado por altos e baixos no século XIX e parte do século XX (ALVES, 2004).

Embora, no início do século XX, a produção de álcool combustível no Brasil tenha sido iniciada muito precariamente, por volta da década de 1930, quando um decreto governamental criou a Comissão de Estudos sobre Álcool-Motor, órgão ligado ao extinto Instituto do Açúcar e do Álcool – IAA (ALVES, 2004), somente em 1975, com o advento do Programa Nacional do Álcool,

também conhecido como Proálcool, esse produto passou a ser destinado para fins combustíveis, em substituição à parte da gasolina consumida.

Nos últimos tempos, o governo federal passou a estimular a produção de álcool como combustível que, embora iniciada com o Proálcool em 1975, somente na década de 80, após a segunda crise do petróleo, ocorrido em 1979, é que ocorreu um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade; em vista disso, as áreas de produção de cana-de-açúcar vêm aumentando continuamente, sobretudo na região Centro-Oeste do Brasil (SILVA et al., 2007).

Atualmente, a lavoura de cana-de-açúcar do Brasil constitui uma das atividades mais eficientes de todo o agronegócio mundial, com uma área de quase 7 milhões de hectares cultivados e uma colheita estimada, na safra 2007/2008, de 547,2 milhões de toneladas (CÔRREA et al., 2007).

Desse total, Minas Gerais responde por 7,72% da produção, o que corresponde a, aproximadamente, 38 milhões de t de cana-de-açúcar, em uma área de 490 mil hectares, sendo a produção de álcool de 1,7 bilhão de litros e a produção de açúcar de 2,4 milhões de toneladas, ocupando o terceiro lugar entre as unidades da Federação (CÔRREA et al., 2007). A produção concentra-se, principalmente, na região do Triângulo Mineiro, que responde por 70% da colheita de cana-de-açúcar, seguida do Sul de Minas (11%) e, em terceiro lugar, na região Oeste (5%) (CAMPOS FILHO; SANTOS, 2007).

Embora a expansão experimentada pela indústria sucroalcooleira, especialmente no final da década de 1990, depois de viver longo período de estagnação (CAMPOS FILHO; SANTOS, 2007), venha enaltecendo, de forma mais contundente, apenas os aspectos benéficos dessa atividade, não há como reconhecê-la como uma das atividades mais geradoras de grandes quantidades de resíduos de diferentes características e tipologias (ALMEIDA et al., 2007), tendo sido, por meio da Resolução CONAMA n.º 1, de 23 de janeiro de 1986, incluída entre aquelas atividades para cujo licenciamento ambiental é exigido a elaboração de estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto ambiental – RIMA (MIRRA; SAKATSUME, 2008).

## **2.2. Fabricação de açúcar e álcool e os impactos ambientais associados**

No processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar, as operações fabris compreendem, basicamente, as seguintes fases: preparação da matéria-prima; trituração; esmagamento da cana e extração do caldo; purificação do caldo – sulfitação, calagem, pré-aquecimento, decantação; evaporação; cozimento; cristalização; turbinagem; secagem e ensacamento (BDN, 1999).

Na operação de turbinagem, ou centrifugação, conforme FEAM (2003), são obtidos o açúcar de primeira, o mel rico e o mel pobre.

O mel rico retorna ao cozimento e o mel pobre é utilizado para a fabricação do açúcar de segunda. Os cristais de sacarose obtidos são submetidos à secagem, classificação e embalagem. O açúcar de segunda é centrifugado, sendo o mel utilizado para a produção de açúcar de terceira, que é utilizado como semente na obtenção da massa de primeira.

O açúcar de terceira é também centrifugado, sendo o melaço resultante utilizado na destilaria ou comercializado com terceiros.

A produção de álcool pode advir do melaço da fabricação do açúcar; diretamente do caldo extraído da cana-de-açúcar (BDN, 1999) ou, ainda, do melaço diluído com o caldo direto, constituindo o caldo misto (KIEHL, 1985; LUDOVICE, 1997; FEAM, 2003).

Uma vez definido o caldo a ser utilizado, o processo de obtenção do álcool, inicia-se com o tratamento desse caldo, que envolve desde operações mais simples, como limpeza mecânica por peneiragem, até tratamentos físico-químicos, com adição de produtos químicos, aquecimento e decantação, resultando no mosto a ser fermentado (BDN, 1999).

O mosto é encaminhado às dornas de fermentação, onde recebe microrganismos na forma de uma suspensão de leveduras que fermentam o açúcar contido no caldo, transformando-o em gás carbônico e vinho que contém o álcool e outros produtos (FEAM, 2003).

A recuperação ou separação do álcool contido no vinho é realizada mediante a destilação fracionada em colunas específicas, obtendo-se a flegma (mistura hidroalcoólica impura, englobando água e os componentes voláteis do vinho) e a vinhaça (todos os componentes não voláteis do vinho).

A flegma é submetida à retificação, obtendo-se o álcool retificado ou hidratado que pode sofrer desidratação, gerando álcool anidro carburante. Como efluentes desse processo resultam ainda duas frações: a flegmaça e óleo fúsel (mistura complicada de ésteres, aldeídos, cetonas e álcoois de pesos moleculares mais elevados que o etanol), esse vendido a terceiros para redistilação e obtenção de outros produtos (BDN, 1999; FEAM, 2003).

A produção de cachaça obedece às mesmas operações, porém, geralmente, em menor escala; ressaltando-se que o sistema de destilação, para a produção de cachaça de alambique, é o de batelada, ou seja, o vinho é colocado todo de uma só vez na panela e destilado. Logo após, esgota-se o alambique para nova operação (PASCOAL FILHO, 2007). No caso de cachaça industrial, a destilação é realizada no sistema contínuo, em colunas ou torres de destilação (CARDOSO, 2001).

Em relação aos principais impactos ambientais ocasionados pelos diferentes processos produtivos, pode-se dividi-los em duas categorias: os gerados da fase agrícola e os da fase industrial. Na fase agrícola, destacam-se (PIACENTE, 2005):

- Redução da biodiversidade causada pelo desmatamento e pela implantação da monocultura canavieira;
- Contaminação das águas superficiais e do solo por meio do uso intensivo de adubos, corretivos minerais e aplicação de herbicidas;
- Compactação do solo em razão do intensivo tráfego de maquinaria pesada, durante o plantio, os tratamentos culturais e a colheita;
- Assoreamento de corpos d'água devido à erosão do solo em áreas de renovação de lavoura;
- Eliminação de fuligem e gases de efeito estufa na queima, durante o período de colheita.

Já na fase industrial pode-se relacionar:

- Geração de resíduos potencialmente poluidores como a vinhaça e a torta de filtro;
- Utilização intensiva de água para o processamento industrial da cana-de-açúcar;
- Forte odor gerado na fase de fermentação e destilação do caldo para a produção de álcool.



Especificamente em relação às destilarias de álcool, embora seu controle ambiental venha evoluindo ao longo dos anos, permanece como principal foco de atenção o gerenciamento das águas residuárias industriais, principalmente a vinhaça, tanto pelos grandes volumes gerados como pelo potencial poluidor desse efluente, principal foco deste trabalho, no que tange a sua utilização em sistemas de fertirrigação de canaviais.

Principal efluente líquido gerado na fabricação de álcool e aguardente, a vinhaça, também conhecida por restilo, tiborna, vinhoto, caldas, coxixi, vinhote ou garapão (BRAILE; CAVALCANTI, 1979), é originada no processo de destilação do mosto (caldo fermentado). Apresenta elevada proporção de água, predominância da matéria orgânica sobre a mineral e maior riqueza de potássio em relação aos minerais totais e aos nutrientes nitrogênio e fósforo (KIEHL, 1985).

A sua importância reside nos seus elevados potencial poluidor e volume gerado, pois trata-se de despejo com pH ácido, alta temperatura e elevada concentração de matéria orgânica (LUDOVICE, 1997), sendo que, para cada litro de álcool produzido, são gerados entre 10 e 15 litros de vinhaça (PIACENTE, 2005), dependendo das condições locais. Em relação à produção de aguardente, essa proporção é reduzida para 5 a 6 L (PASCOAL FILHO, 2007).

No Quadro 1, estão apresentadas as composições de vinhaças provenientes de três fontes: mosto de melaço, mosto de caldo e mosto misto.

Essas características, principalmente as elevadas DBO, DQO e concentrações de potássio, cálcio e magnésio, praticamente inviabilizam os tratamentos convencionais para o citado despejo e, até o final dos anos 70, volumes crescentes de vinhaça eram lançados em mananciais superficiais, principalmente em cursos d'água como rios e ribeirões das proximidades das usinas de açúcar e álcool (VIANA, 2006).

Quadro 1 – Características físicas e químicas de vinhaças geradas a partir de três fontes

Variáveis (mg.L <sup>-1</sup> )	Melaço	Mosto Caldo	Misto
Sólidos totais	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos	21.500	3.700	12.700
Carbono	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Potássio (K <sub>2</sub> O)	3.740 - 7.880	1.200 – 2.100	3.340 – 4.660
Enxofre (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	6.400	600 – 760	3.700 - 3.780
Cálcio (CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Nitrogênio (N)	450 – 1.610	150 – 700	480 – 710
Magnésio (MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 – 290	10 – 210	9 – 200
DBO	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Acidez (pH)	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura	80 – 100	80 – 100	80 – 100

Fonte: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB (1985).

Nota: Temperatura (°C); pH e relação C/N adimensionais.

A presença desse efluente em corpos hídricos pode causar depleção nos níveis do oxigênio dissolvido no meio, criando condições adversas à sobrevivência da biota aquática, uma vez que, para degradar a matéria orgânica afluyente, o corpo receptor se vê obrigado a disponibilizar seu oxigênio dissolvido, proporcionando o processo de oxidação do material (FEAM, 2003; VON SPERLING, 2005). Evidentemente, tais efeitos variam conforme a capacidade de autodepuração do corpo hídrico e da vazão dos despejos.

### 2.3. Disposição de águas residuárias no solo

A fertirrigação é técnica de disposição/tratamento, onde prioriza-se o aproveitamento dos nutrientes presentes na água residuária, razão suficiente para se considerar ser este método de disposição excelente opção para disposição/tratamento de águas residuárias agroindustriais. O aproveitamento de águas residuárias ricas em nutrientes na fertirrigação de culturas agrícolas,

possibilita o aumento da produtividade e qualidade dos produtos colhidos, redução da poluição ambiental, além de promover melhoria nas características químicas, físicas e biológicas do solo (MATOS, 2002). Entretanto, existem ressalvas. Conforme Garcia (2003), o uso agrícola de águas residuárias deve ser cuidadosamente planejado, no sentido de controlar, em longo prazo, efeitos como salinidade, sodicidade e desbalanço de nutrientes sobre o solo e culturas. Matos (2006) acrescenta que a aplicação de águas residuárias como fertirrigação deve ser definida pela capacidade do solo e das culturas em assimilar o resíduo aplicado, sem comprometimento da qualidade do solo e risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas e não, simplesmente, em função de taxas de aplicação laminares, definidas por critérios exclusivamente hidráulicos ou calculadas com base na evapotranspiração da cultura.

Vieira e Ramos (1999), citados por Garcia (2003), afirmaram que, para um adequado manejo do sistema de fertirrigação, é importante conhecer a textura, a capacidade de troca catiônica (CTC), a salinidade, o pH, os teores de macro e micronutrientes, a mobilidade dos nutrientes no solo, além das características fisiológicas da cultura, tais como a tolerância à salinidade, absorção de nutrientes, entre outras.

Embora águas residuárias agroindustriais e domésticas tenham conteúdos relativamente baixos de material orgânico, sua aplicação freqüente, em altas doses, pode incorporar quantidades apreciáveis de matéria orgânica no solo. Entretanto, de forma geral, as principais alterações advindas da aplicação de águas residuárias no solo costumam ser químicas, o que pode, inclusive, vir a proporcionar alterações físicas no solo (MATOS, 2004).

A disposição de efluentes no solo não é novidade, sendo que aplicação de esgotos na agricultura é prática antiga. A China sempre é citada como país onde o esgoto doméstico há muito é disposto no solo. No Ocidente sabe-se que, na Prússia, a aplicação de esgotos no solo era praticada desde 1560. Na Inglaterra, por volta de 1800, foram desenvolvidos muitos projetos para a utilização agrícola de esgoto doméstico, especialmente em razão do combate à epidemia de cólera. A adoção da prática de uso do solo como meio de disposição do esgoto ou do lodo tem sido freqüente em muitos países (BETTIOL et al., 2008). Segundo esse mesmo autor, a utilização do lodo de

esgoto ou esgoto líquido em solos agrícolas tem como principais benefícios a incorporação dos macronutrientes nitrogênio e fósforo, e dos micronutrientes zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio. Pode-se dizer que, normalmente, o lodo de esgoto fornece ao solo os nutrientes para as culturas, no entanto, é necessário ter conhecimento da sua composição, a fim de se calcular as quantidades adequadas a serem incorporadas, sem correr o risco de provocar toxicidade às plantas e, em certas situações, aos animais e ao homem, sem poluir o ambiente.

A manipueira, efluente gerado no processamento da mandioca para obtenção de farinha e polvilho, apresenta atributos favoráveis, do ponto de vista do uso agrícola, como fonte de nutrientes às plantas; todavia, pode causar danos a estas e ao solo, caso seja utilizada sem critérios técnicos de aplicação. Por ser uma água rica em potássio, apresentando concentração de cerca de  $580 \text{ mg L}^{-1}$ , sua aplicação pode afetar negativamente o solo, podendo provocar a dispersão da argila e, ou, desequilíbrio nutricional (MELO et al., 2006). O mesmo alerta é feito por Lo Mônaco (2005), em relação à possibilidade de aproveitamento dos nutrientes contidos na água residuária do processamento de frutos do cafeeiro no cultivo agrícola, utilizando a técnica de fertirrigação. Segundo o autor, a utilização dessa água, com significativa concentração de potássio, como fertilizante, deve ser feita de forma criteriosa para que não venha a causar prejuízos ao solo e à cultura.

Ao verificarem alterações químicas de um solo agrícola, decorrente da aplicação, em dias não chuvosos, de  $99 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\text{ano}$ , em diversas culturas, por 8 anos consecutivos, de uma água residuária de suinocultura, Dal Bosco et al. (2008) constataram aumento relevante nas concentrações de cálcio, magnésio, sódio, nitrogênio, fósforo, potássio e matéria orgânica, principalmente na camada de 0-30 cm do solo.

### **2.3.1. Fertirrigação de culturas agrícolas com vinhaça**

Quanto à utilização agrícola da vinhaça, as primeiras experiências sobre sua aplicação na lavoura canavieira datam de 1918, em Pernambuco, entretanto os resultados não foram satisfatórios (LUDOVICE, 1997), tendo sido tal prática retomada, somente por volta de 1943, com aplicações sistemáticas.

A partir das proibições de despejo da vinhaça nos mananciais superficiais, mediante a publicação da Portaria do Ministério do Interior n.º 323, de 29 de novembro de 1978 (SILVA et al., 2007), deu-se início à adoção e ampla difusão da prática da fertirrigação de canaviais, contrariando, segundo Aguiar (2002), ao que se apregoava de que a vinhaça seria considerada inadequada para aplicação no solo, em vista de sua elevada acidez.

Se, por um lado, a vinhaça, devido às suas características, presta-se admiravelmente bem como substituta de alguns fertilizantes minerais e provoca uma série de modificações nas características físicas e químicas dos solos, como aumento do pH, disponibilidade de nutrientes como potássio e ferro, aumento do conteúdo de matéria orgânica (embora não persistentes), de capacidade de troca catiônica e aumento na condutividade elétrica no solo (GLÓRIA, 1994). Por outro lado, sua utilização contínua nos mesmos solos, mesmo que em doses consideradas baixas, ano após ano, pode proporcionar saturação de cátions, principalmente de potássio na CTC dos solos, ocasionando problemas de lixiviação de cátions para águas subterrâneas (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP, 2008) e desbalanço de nutrientes.

Camargo et al. (1983) afirmaram que a vinhaça disposta no solo, com bom planejamento, tem seu alto potencial poluidor diminuído, graças ao elevado poder do sistema solo em resistir às mudanças devidas a agentes exógenos. Entretanto, esse poder não é ilimitado e, sendo assim, exageros podem alterar características desejáveis do solo, tanto na direção de uma melhoria como no de uma degradação, em termos de produção agrícola, assertiva corroborada por Szmrecsányi (1994), que alerta que o uso indiscriminado ou excessivo da vinhaça como fertilizante pode comprometer, irremediavelmente, o meio ambiente e a própria rentabilidade agrícola e industrial da produção açucareira e alcooleira.

Embora a vinhaça possa promover melhoria na fertilidade do solo, as quantidades aplicadas não devem ultrapassar sua capacidade de troca iônica, isto é, as doses devem ser definidas de acordo com as características de cada solo, de forma a não proporcionar o desbalanceamento de elementos minerais (SILVA et al., 2006).

Melo e Silva (2007) alertaram que, na maioria das vezes, aplicada diluída na proporção de uma parte de vinhaça por 3 a 6 de água amoniacal, a aplicação acima do limite, em especial do potássio ( $K_2O$ ), causa saturação do solo com este elemento, podendo ocasionar problemas de lixiviação de íons para a água subterrânea. Portanto, existe a necessidade de estudos específicos e localizados a fim de que, ao se elaborar o projeto de fertirrigação com vinhaça, tais riscos possam ser evitados, mediante uma utilização adequada, proporcionada pelo total conhecimento da capacidade do solo e das necessidades da cultura agrícola em exploração.

Em experimento no qual diferentes doses de vinhaça (0, 350 e 700  $m^3 \cdot ha^{-1}$ ) foram aplicadas em três tipos de solos (Nitossolo, Argissolo e Espodossolo), reproduzidos em 27 colunas de PVC, verificou-se redução na concentração de potássio no lixiviado conforme a classificação textural e o teor de argila do solo; sendo que a concentração de potássio trocável aumentou em todos os solos, variando com a profundidade do perfil (BRITO et al., 2007). Houve aumento na concentração do sódio nas camadas mais profundas do solo, o que levou os autores a atribuírem o fato à competição pelos sítios de troca, proporcionada pelo potássio contido na vinhaça adicionado ao solo, tendo este íon deslocado o sódio presente para as camadas mais profundas, evidenciando-se o risco de contaminação de águas subterrâneas.

Em experimento conduzido na Usina Salgado, município de Ipojuca-PE (LYRA et al., 2003), avaliou-se a qualidade da água do lençol freático em área cultivada com cana-de-açúcar e fertirrigada com vinhaça, abrangendo três classes de solos: Espodossolo ferro cárbico (textura arenosa), Gleissolo háplico  $t_b$  (textura argilosa) e Gleissolo háplico  $t_b$  (textura muito argilosa), tendo sido constatadas alterações na qualidade da água, quando a vinhaça foi aplicada na dose de 300  $m^3 \cdot ha^{-1}$ .

Foram aplicadas diferentes doses de vinhaça em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, na germinação e vigor de sementes de milho, tendo sido verificados, após um período de 30 dias de incubação dos solos contidos nos vasos, em casa de vegetação, aumentos consistentes no teor de carbono orgânico, principalmente para doses acima de 400  $m^3 \cdot ha^{-1}$  (PEREIRA et al., 1992).

Em experimento realizado para verificar os efeitos da vinhaça natural e biodigerida no comportamento químico de amostras de latossolos de textura média, cultivados com cana-de-açúcar, concluiu-se que ocorreu contribuição favorável da vinhaça para o aumento no conteúdo de matéria orgânica no solo, sobretudo na sua forma *in natura* (LONGO et al., 1999). Esses autores também verificaram comportamento superior da vinhaça biodigerida na disponibilização de potássio, cálcio e magnésio trocáveis e, por conseguinte, concorrendo para maior suprimento do solo com estas bases.

Ao avaliar as produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça (0, 150, 300, 450 e 600 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>), concluiu-se que os melhores resultados foram obtidos com as doses de 300 e 400 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> e que a aplicação de 600 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> apresentou-se inviável, seja pelo aumento dos custos de produção, como pelas produtividades agrícola e industrial inferiores às obtidas com a aplicação das doses intermediárias (PAULINO et al., 2002).

Com o objetivo de verificar o efeito do uso da torta de filtro e da vinhaça, como corretivos, na recuperação de um solo salino-sódico, Ruiz et al. (1997) realizaram um experimento em casa de vegetação, utilizando solo aluvial, eutrófico, textura franca. Os autores concluíram que a lixiviação com a vinhaça mostrou resultados superiores aos apresentados pela água de chuva, em todos os tratamentos, indicando a possibilidade de recuperação dos solos salino-sódicos com o uso da vinhaça, sem incorporação de corretivo convencional.

Ao aplicar diferentes doses de vinhaça em colunas de PVC, preenchidas com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico distrófico, fase terraço, utilizando-se sementes de sorgo como planta indicadora, Sengik (1983) verificou que a aplicação de maiores doses de vinhaça acentuou o desbalanceamento catiônico e aumentou a condutividade elétrica no solo, com ocorrência de reduções no crescimento do sorgo.

A avaliação da influência da aplicação da vinhaça em características químicas da matéria orgânica e da fração mineral de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, fase cerrado, cultivado por sete anos, com milho, indicou ser esta água residuária importante fonte de cálcio e magnésio, equivalentes às de

fertilizantes minerais, tendo superado estes como fonte de potássio (COELHO, 1990).

A vinhaça, quando aplicada ao solo, provoca aumento na atividade microbiana, em consequência da adição da matéria orgânica nela contida. Essa atividade é acompanhada pelo aumento na produção de mucilagem, que pode favorecer a agregação e promover aumento na estabilidade estrutural do solo (PASSARIN et al., 2007). Para comprovar essa assertiva, o autor submeteu um Latossolo Vermelho distroférico típico textura muito argilosa, cultivado com cana-de-açúcar, a diferentes doses de vinhaça, após a terceira e a quarta colheitas (segunda e terceira socas), em experimento conduzido no campo, com amostras de solo coletadas na profundidade de 0 a 40 cm e concluiu que não ocorreram mudanças significativas nos índices de agregação na profundidade estudada.

Ao efetuar aplicação de vinhaça, associada à manutenção do palhiço, em Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, Canellas et al. (2003) constataram alterações nas propriedades químicas do solo e melhoria na sua fertilidade e na quantidade da matéria orgânica, com aumento do conteúdo de substâncias húmicas alcalino-solúveis mais condensadas.

Solos cultivados com cana-de-açúcar, que receberam grandes doses de vinhaça, por longo período de tempo (mais de 10 anos), mediante fertirrigação e aplicação por inundação, sofreram alterações na cor e resistência à ruptura dos agregados, elevação na condutividade elétrica, além de grande incremento na concentração de potássio trocável (MAZZA, 1985).

Resende et al. (2006), ao aplicarem  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  de vinhaça, em área plantada com cana-de-açúcar, observaram incremento de 13% na produção de açúcar.

Ao aplicar diferentes doses de vinhaça ( $0, 100, 200, 400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) em abacaxizeiro cultivado em solo de baixo potencial de produção, De Paula et al. (1999) constataram aumento da produtividade, bem como da acidez dos frutos, além de elevação no teor de potássio, cálcio e magnésio trocáveis na camada de 0-20 cm e de potássio trocável na camada de 20-40 cm, com valores proporcionais às doses aplicadas.

Com a vista a averiguar os efeitos da adição de vinhaça ao solo sobre a eclosão e reprodução dos nematóides formadores de galhas (*Meloidogyne*



*javanica* e *M. incognita*), em experimentos realizados em laboratório e em casa de vegetação, Pedrosa et al. (2005) verificaram redução da eclosão dos juvenis, redução da densidade de ovos e juvenis dos nematóides, sendo tais efeitos diretamente proporcionais ao volume de vinhaça adicionado, verificando-se que a dose de 500 m<sup>3</sup>·ha foi a mais indicada para manejo de *M. incógnita* na cultura de cana-de-açúcar.

Segundo Kiehl (1985), doses recomendáveis, para aplicação por aspersão, são as seguintes: 35 a 50 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>, para vinhaça de mosto de melaço; para vinhaça proveniente de mosto de caldo (diluída), 120 a 150 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>; e para vinhaça mista, 70 a 100 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>, entretanto, sem especificar a classe de solo. O autor citou que a dose deve ser equivalente a 200 kg·ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

A Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG (RIBEIRO et al., 1999) alerta, no entanto, que a quantidade de vinhaça a ser aplicada na cultura da cana-de-açúcar depende da CTC potencial do solo, da capacidade de extração de potássio da cana-de-açúcar e do teor de K<sub>2</sub>O na vinhaça.

#### **2.4. Legislação relativa à disposição de vinhaça no solo**

No tocante à Legislação Ambiental relativa ao setor sucroalcooleiro, sua origem remonta às condições nas quais tais empreendimentos eram instalados, desde os primórdios dessa atividade no país: em zona rural – próximos à matéria-prima e em locais onde houvesse fartura de água e que essa fosse de fácil captação, daí a localização às margens de cursos d'água.

Essa forma de pensar foi predominante até o lançamento do Plano Nacional do Alcool, nos anos setenta, quando os problemas ambientais associados a essa atividade, expostos de forma mais contundente, devido à instalação de grandes destilarias, anexas às usinas de açúcar ou de forma autônoma, despertaram a preocupação de estudiosos da área ambiental e do poder público – principalmente em relação à vinhaça - o que resultou em uma legislação específica para o setor.

Embora a prática de lançamento de águas residuárias em cursos d'água seja vedada por dispositivos legais desde 1934, especificamente em

relação ao descarte da vinhaça, a Portaria n.º 322, publicada pelo Ministério do Interior, em 1978, proibiu, terminantemente, o lançamento direto e indireto de vinhaça de destilarias em qualquer coletor hídrico, obrigando as agroindústrias a apresentarem projetos para implantação de sistemas que utilizassem, de modo racional, a vinhaça e águas residuárias geradas pela fabricação de álcool (GRANATO, 2003). Posteriormente, foi publicada a Portaria n.º 158, de 3 de novembro de 1980, do Ministério do Interior, por meio da qual se delegava aos Estados a competência para exercer a fiscalização nos empreendimentos do setor sucroalcooleiro e de analisar e aprovar projetos de controle ambiental.

Com vista a um controle mais efetivo dessa atividade, o estado de Minas Gerais fez publicar a Lei Estadual n.º 9.367, de 11 de dezembro de 1986, proibindo o lançamento de vinhoto e águas residuárias, em qualquer manancial de água, sem tratamento prévio.

Uma vez que a resposta técnica do setor deu-se pela adoção de sistema de fertirrigação dos canaviais com vinhaça e demais águas residuárias industriais, a regulamentação dessa prática se fez necessária, traduzida na publicação da Deliberação Normativa COPAM n.º 012/86, na qual, em suma, estabeleceram-se critérios para o armazenamento dos efluentes das usinas de açúcar e destilarias de álcool e aguardente e para disposição de vinhaça no solo, fixando, inclusive, limites quanto às doses de aplicação, conforme a origem do resíduo: caldo direto, melaço ou caldo misto (mistura de melaço e caldo de cana).

Desde então, a DN n.º 012/86 tem sido a referência para os projetos de fertirrigação, entretanto, há uma lacuna entre o monitoramento das áreas agrícolas exercido pelas empresas, com a conseqüente geração de informações acerca do comportamento do solo e mananciais aquíferos, e aquele exercido pelos órgãos de controle ambiental. Além disso, há dissociação entre o banco de dados do Sistema Estadual de Meio Ambiente (SISEMA) e desconformidades nas ações. Acredita-se que os resultados deste trabalho tenham muito a contribuir para que sejam minimizados os impactos ambientais da atividade.

Na mencionada Deliberação, estão definidas as doses máximas de aplicação de vinhaça no solo, conforme a origem do caldo, ou seja,  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ,  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$  e  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ , para vinhaças

provenientes da destilação de caldo direto misto e melaço, respectivamente, sem qualquer distinção quanto às características dos solos que receberão o efluente. Na mesma Deliberação, está estabelecido que a adoção de doses de aplicação de vinhaça, iguais ou inferiores àquelas mencionadas, deverá ser precedida de estudos referentes a sua caracterização, às necessidades nutricionais da cultura e aos efeitos sobre as características físicas, químicas e biológicas do solo, os quais serão avaliados pelo COPAM que, a seu critério, poderá determinar, caso necessário, reduções nas doses. Entretanto, não são fornecidas as diretrizes para o cumprimento dessa exigência por parte do empreendedor, tampouco são aventadas possibilidades de adoção de taxas mais elevadas.

A CETESB, por meio da Norma P4.231 (versão janeiro/2005), estabeleceu, como premissa à aplicação da vinhaça, que a concentração máxima de potássio trocável no solo não pode exceder 5% da sua Capacidade de Troca Catiônica (CTC) a pH7 e que, atingido tal limite, a aplicação deve ser efetuada de forma a somente repor a extração média de K da cultura.

Além disso, com base na referida Norma exige-se a caracterização da qualidade do solo que receberá a aplicação da vinhaça, contemplando as seguintes variáveis: cálcio, magnésio e potássio trocáveis e sulfato, hidrogênio dissociável, matéria orgânica, CTC, pH e saturação por bases.

Ao se adotar o potássio como referência para a aplicação da vinhaça em solo agrícola, tanto a CFSEMG (1999) como a CETESB (2005) consideram esse elemento como limitante, face a sua concentração nessa água residuária, o que vai ao encontro do que foi preconizado por Matos (2002), que afirmou que a taxa de aplicação de águas residuárias agroindustriais deve estar baseada na dose de nutrientes recomendados para as culturas agrícolas pois, caso esses níveis sejam suplantados, além de comprometer a produtividade da cultura, podem provocar poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

## **2.5. Aspectos importantes a serem considerados para adequada definição de doses de vinhaça a serem dispostas no solo**

Uma grande variedade de substâncias químicas tem sido introduzida na agricultura, a fim de se fornecer ao solo condições necessárias ao bom desenvolvimento das culturas. Por outro lado, o uso de tais substâncias vem causando sérios problemas no ambiente (COSTA et al., 1999). No Brasil, esta preocupação se reveste de especial importância, visto que a utilização de resíduos industriais na agricultura tem sido feita, em muitos casos, de modo indiscriminado (MELO et al., 2006).

Esses insumos, quando aplicados acima da capacidade do solo, podem liberar íons e compostos tóxicos, os quais poderão poluir o solo e águas subterrâneas. Os íons disponibilizados à solução do solo podem ser adsorvidos pelo meio, absorvidos pelas plantas ou lixiviados para as camadas sub-superficiais do solo, sendo que um excesso de íons no solo, notadamente de monovalentes, pode influenciar negativamente nas suas características físicas e químicas, podendo provocar a dispersão da argila e o desbalanceamento nutricional nas plantas ou, até mesmo, direta toxicidade (MELO, 2004; GONÇALVES, 2007).

São diversos os fatores que controlam o transporte de substâncias contaminantes em meios porosos, sendo que estas substâncias atravessam os vazios do solo em solução. Assim sendo, o transporte da substância no meio poroso depende do fluxo do fluido no qual ela está dissolvida e de processos interativos por meio dos quais a sua concentração pode sofrer alterações (DYMINSKI, 2008).

Os principais processos que controlam a migração de contaminantes através de meios porosos podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos (DYMINSKI, 2008).

Os processos físicos básicos são a convecção e a difusão-dispersão hidrodinâmica. A convecção é o processo pelo qual a água carrega consigo os solutos dissolvidos, cuja quantidade transportada depende de sua concentração, do volume de água fluindo e da velocidade da mesma.

O mecanismo de difusão-dispersão hidrodinâmica engloba o mecanismo de dispersão mecânica e o transporte por difusão. À medida que o

soluto se movimenta no meio poroso, o processo de dispersão age diluindo o soluto, isto é, reduzindo sua concentração (GONÇALVES, 2007).

Já os principais processos químicos, segundo Delgado (2008, citado por DYMINSKI, 2008), podem ser resumidos em reações de adsorção-dessorção, ácido-base, dissolução-precipitação, oxidação-redução, além de formação de complexos. A biodegradação, em que microrganismos, por meio do seu metabolismo, transformam moléculas orgânicas em outras menores, pode influenciar a migração de contaminantes no solo.

Segundo Dyminsky (2008), pode-se dizer que as características que intervêm no transporte de substâncias em solos são:

- características do contaminante (solubilidade, densidade, concentração, pH, DBO, DQO etc.);
- características do solo pelo qual ele percola (granulometria, mineralogia da fração argila, permeabilidade, matéria orgânica, etc.);
- características do ambiente (tempo de exposição do solo ao contaminante, presença de microrganismos, condições hidrogeológicas, condições aeróbicas/anaeróbicas e temperatura).

A lixiviação de sais no solo é exemplo de transporte de substâncias no solo. A água de irrigação ou de chuva mistura-se com a solução do solo e desloca solutos no perfil (FERREIRA, 2006). Uma parte dos solutos poderá ser adsorvida ao complexo coloidal, outra parte absorvida pelas plantas ou, ainda, precipitada (GARCIA, 2003); o restante é transportado em direção vertical descendente, após uma chuva ou irrigação.

Como agente interveniente neste processo, a presença de diferentes espécies de cátions na solução do solo proporciona competição entre eles, pelos sítios de troca, favorecendo a lixiviação daqueles com menor força de adsorção, o que constitui um alerta quanto ao perigo de contaminação dos mananciais de água subterrânea (GARCIA, 2003).

Vários modelos teóricos foram desenvolvidos na tentativa de descrever, de maneira o mais fiel possível, o movimento de solutos no solo (MATOS, 1994), uma vez que os modelos físico-matemáticos constituem valiosa ferramenta no estudo do transporte de nutrientes no solo. Nesses modelos, procura-se descrever o estado atual e prever o comportamento futuro do movimento dos elementos no perfil do solo, contribuindo para o uso

adequado da fertirrigação na agricultura (OLIVEIRA et al., 2004). Todavia, há grande dificuldade em envolver todas as características pertinentes ao meio ambiente, a fim de obter um modelo realmente capaz de prever o processo de deslocamento e retenção dos solutos no meio (GARCIA, 2003), considerando, como descrito, que a distribuição de um soluto no solo é o resultado de complexos fenômenos, os quais não podem ser previstos inteiramente por nenhuma aproximação teórica, baseada em simples suposições.

No entanto, a interação dos processos ocorrendo de forma simultânea pode ser verificada pela comparação de dados atuais com modelos simplificados (NIELSEN; BIGGAR, 1962). Entretanto, segundo Borges Júnior e Ferreira (2006), o advento desses modelos despertou, nos pesquisadores, outro problema relativo à quantificação adequada dos parâmetros envolvidos nas equações de transporte de solutos no solo, como o fator de retardamento e o coeficiente dispersivo-difusivo.

O fator de retardamento, segundo Ferreira (2006), expressa a capacidade de um meio poroso em reter um soluto durante um processo de escoamento de uma solução. Durante o fluxo, segundo Costa (2002), a transferência da massa do soluto da solução para a matriz sólida do solo, onde fica retido, implica na redução da velocidade da frente de contaminação em relação à velocidade do fluido percolante.

O coeficiente dispersivo-difusivo traduz o efeito aditivo de dois fenômenos de mistura, ou seja, a difusão que é um processo espontâneo, que resulta do movimento térmico dos íons e moléculas em solução, e a dispersão que decorre do movimento diferenciado de solutos no solo, proporcionado por variações na velocidade de deslocamento da solução dentro dos poros individuais e entre poros de diferentes formas, tamanhos e direções (FERREIRA et al., 2006).

Portanto, a importância do estudo do transporte de solutos no solo reside no fato de que, a partir do conhecimento das propriedades e das interações de determinada substância química com o meio e de sua movimentação e persistência no solo, é possível se prever os riscos de contaminação e os impactos que ela possa causar ao meio ambiente (COSTA et al., 1999).



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

A vinhaça utilizada nos experimentos foi coletada em outubro de 2007, na Companhia Agrícola Pontenovense, localizada no município de Urucânia-MG, coordenadas 20°18'4,8" Latitude Sul e 42°41'23,8" Longitude Oeste. As amostras foram coletadas na unidade de produção de açúcar e álcool, após passagem pelo sistema de resfriamento, a uma temperatura de 60°C.

A caracterização da vinhaça (Quadro 2) foi realizada no Laboratório de Qualidade da Água, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), tendo sido determinadas as seguintes características: pH (H<sub>2</sub>O e KCl), condutividade elétrica (CE), com água destilada na proporção 1:2,5, utilizando-se condutivímetro; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pelo método de Winkler, Demanda Química de Oxigênio (DQO), em condensador, pelo método do refluxo aberto; potássio e sódio por fotometria de emissão de chama; cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica; sólidos totais, após secagem, em estufa, a 103-105°C; sólidos fixos totais, após combustão em mufla, a 550-600°C; sólidos voláteis totais, mediante a diferença entre os totais e os fixos; sólidos sedimentáveis em cone de Imhoff, sendo todas as análises efetuadas segundo a American Public Health Association – APHA (1995), à exceção do nitrogênio total cuja quantificação foi realizada utilizando-se o método de Kjeldahl com a adição de ácido salicílico (MATOS, 2006). O amônio foi quantificado pelo método do salicilato (KEMPERS; ZWEERS, 1986).



Quadro 2 – Características da vinhaça utilizada no experimento

Características	Valores (mg·L <sup>-1</sup> )
CE	9,0 *
pH	3,8 *
ST	31.522
SV	21.443
Ca	1340
Mg	473
K	2484
Na	10
N <sub>T</sub>	733
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,038
DBO	16.769
DQO	28.572

(\*) CE em (dS m<sup>-1</sup>) e pH adimensional.

Amostras de Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd), foram coletadas, na camada de 0-20 cm, nos municípios de Capinópolis (LVd e LVef) e Viçosa (LVAd), tendo sido sua caracterização realizada nos Laboratórios de Solo e Resíduos Sólidos do DEA e Física do Solo do Departamento de Solos da UFV (Quadros 3 e 4).

Os solos foram secos ao ar, destorroados, passados em peneira de malha 2 mm, tendo sido incluídas, em sua caracterização física, teor de água, obtida em mesa de tensão a 0,01 MPa; massa específica do solo, pelo método da proveta; massa específica de partículas, pelo método do balão volumétrico, análise granulométrica e argila dispersa em água AD, pelo método da pipeta de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1997), porém, com utilização de agitação lenta de 50 rpm por 16 h (RUIZ, 2005). O conteúdo de água retida na capacidade de campo (CC) foi obtido em mesa de tensão, a 0,01 MPa.

Quadro 3 – Características físicas e análise textural dos solos utilizados no experimento

Solo	$\rho_s$	$\rho_P$	CE	CC	ADA	Areia		Silte	Argila	Classe textural
						Grossa	Fina			
..... g cm <sup>-3</sup> .....		dS cm <sup>-1</sup>		..... % .....		..... dag.kg <sup>-1</sup> .....				
LVA <sub>d</sub>	0,95	2,36	0,08	37,72	14,67	27,00	14,00	7,00	52,00	Argila
LV <sub>d</sub>	1,32	2,43	0,12	17,36	3,33	24,00	43,00	7,00	26,00	Franco-Argilo-Arenosa
LV <sub>ef</sub>	1,18	2,40	0,07	41,97	10,00	4,00	7,00	29,00	60,00	Muito Argilosa

25

Quadro 4 – Características químicas dos solos utilizados no experimento

Solo	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	MO	N	K	Na	Ca+Mg	Al <sup>3+</sup>	H+Al	CTC <sub>Ef</sub>	CTC <sub>pH7</sub>
			dag kg <sup>-1</sup>	dag kg <sup>-1</sup>	..... mg dm <sup>-3</sup> .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
LVA <sub>d</sub>	5,20	3,89	6,00	0,20	41,24	4,00	0,32	1,51	8,85	1,98	9,31
LV <sub>d</sub>	6,07	4,69	4,10	0,09	107,50	4,00	3,78	0,31	2,47	4,38	6,54
LV <sub>ef</sub>	6,20	5,45	4,00	0,13	175,30	2,80	6,30	0,09	5,01	6,80	11,71

pH<sub>H2O</sub> e pH<sub>KCl</sub> 1N (1:2,5); MO (Walkley-Black); N por digestão Kjeldahl; Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> extraído por Mellich<sup>-1</sup>; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> extraídos por KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; H+Al extraído por acetato de Ca 0,5 mol L<sup>-1</sup>- pH7.

As análises químicas compreenderam pH em água e KCl; quantificação das concentrações de potássio e sódio trocáveis, com extrator de Mehlich-1 e determinação por fotometria de chama; cálcio e magnésio trocáveis por extração com KCl 1 mol·L<sup>-1</sup>; acidez trocável por titulação, utilizando-se como solução extratora o KCl 1 mol·L<sup>-1</sup> e acidez potencial, igualmente por titulação, com extração por extrator de Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997). As capacidades de troca catiônica efetiva e potencial foram determinados pela soma de bases (S<sub>B</sub>) mais acidez trocável e S<sub>B</sub> mais acidez potencial, respectivamente.

A concentração de nitrogênio total e o conteúdo de matéria orgânica foram obtidos utilizando-se o método Kjeldahl modificado (ALVAREZ, s.d.).

Os teores dos minerais da fração argila dos três latossolos (Quadro 5) foram determinados usando os resultados da difratometria de Raios-X e do Ataque Sulfúrico (EMBRAPA, 1997), conforme Resende et al. (1987).

Quadro 5 – Teores dos minerais da fração argila dos latossolos utilizados nos experimentos (em %)

	LVef	LVd	LVAAd
Caulinita	24,70	16,60	42,20
Goethita	1,20	3,20	7,90
Hematita	16,80	3,60	0,00
Gibbsita	13,00	0,60	0,00
Ilmenita	2,40	1,80	1,10
Anatásio	1,90	0,30	0,60

### 3.1. Experimento de incubação de amostras de solos submetidas a diferentes doses de vinhaça

Neste primeiro experimento, os solos foram incubados, em estufa, por um período de 20 dias, em vasos com volume de 2,0 L, confeccionados com garrafas PET, após aplicação de diferentes doses de vinhaça. As doses aplicadas foram baseadas na recomendação de 120 kg·ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, fornecida

para se obter uma produtividade de cana-de-açúcar acima de  $120 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (RIBEIRO et al., 1999).

Tendo em vista a concentração de potássio na vinhaça de  $2480 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Quadro 1, a primeira dose definida foi de  $40,0 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , a partir da qual foram definidas as demais, em ordem crescente, quais sejam,  $80,0 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ,  $160,0 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$  e  $320,0 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , correspondentes a 38, 76, 152 e 302 mL de vinhaça a serem aplicadas nos vasos, considerando-se a área superficial de cada um. Além disso, outros vasos foram preparados para receberem apenas água.

A massa de solo, em cada vaso, foi 1.700 g, tendo sido a superfície lateral dos vasos envolvida em papel alumínio, para se evitar a incidência de luz diretamente sobre as laterais do solo.

A vinhaça foi aplicada no solo nas doses calculadas e os vasos foram mantidos com teores de água próximos à capacidade de campo.

Uma vez obtida essa condição, todos os vasos foram pesados, tendo sido a reposição de água – para manutenção dos solos próximos à capacidade de campo – efetuada diariamente, com base na pesagem dos vasos.

A montagem do experimento obedeceu ao delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, no esquema fatorial  $3\times 5$ , correspondendo a três classes de solo e cinco doses de vinhaça. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, anexa ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA/UFV), no período de 30 de outubro a 20 de novembro de 2007.

A análise estatística dos dados foi realizada com o auxílio do software SAS<sup>®</sup> (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE – SAS, 1996), por meio do procedimento GLM.

Quando a interação solo x dose mostrou-se significativa, em nível de 5% de probabilidade, optou-se por realizar o desdobramento da análise, fixando-se o fator solo, ou seja, comparando todas as doses com a dose testemunha (dose 0) mediante teste Dunnett, separadamente para cada solo. Para as variáveis em que apenas o efeito de solo mostrou-se significativo (não tendo sido verificado efeito significativo da dose e da interação), utilizou-se o teste Tukey para comparar as médias de cada solo. Para o potássio, aplicou-se a técnica de análise de regressão dentro de cada classe de solo, por permitir

estimar concentrações de potássio trocável no solo para diferentes doses de vinhaça aplicadas.

Findo o período de incubação, os solos foram novamente secados ao ar, destorroados e passados em peneira de 2 mm, para a determinação das características massa específica, massa específica de partículas, argila dispersa em água, granulometria, conteúdo de água na capacidade de campo, pH em água e KCl, potássio, sódio cálcio e magnésio trocáveis, nitrogênio total, conteúdo de matéria orgânica, acidez trocável, acidez potencial, CTC efetiva e CTC potencial.

### **3.2. Ensaio em colunas de lixiviação**

O segundo experimento constou de ensaio em colunas de solos contidas em segmentos de tubo de PVC rígido, de 20 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro, preenchidas com as três classes de solos, previamente passados em peneira de 2 mm.

Os segmentos de tubo de PVC tiveram a superfície lateral interna revestida com material arenoso, impregnado na cola aplicada na superfície lateral interna dos tubos, com o objetivo de se evitar caminhos preferenciais para o efluente. O preenchimento das colunas foi realizado de forma gradativa, adicionando-se pequenas porções de solos por meio de funil, tendo sido deixados 5 cm de borda livre nas colunas, ficando cada coluna de solo com 15 cm de espessura.

Com vista a se evitar distúrbios superficiais, quando da aplicação da vinhaça, e proporcionar uma infiltração uniforme, a superfície do solo foi coberta com uma lâmina fina (cerca de 2 mm de espessura) de lã de vidro. Lâmina idêntica foi colocada sobre a tela, na base da coluna, para se evitar perdas de solo.

Os solos acondicionados nas colunas foram saturados, ficando as colunas imersas durante quatro dias em água até dois terços da espessura. Findo esse período, as colunas, sendo três repetições para cada classe de solo, foram interligadas a frascos de Mariotte contendo vinhaça.

Para eliminação de bolhas de ar e iniciar o escoamento em meio saturado, aplicou-se, em todas as colunas, água até que o sistema atingisse

condição de escoamento permanente. Posteriormente, interrompeu-se a aplicação da água e, após a completa infiltração da lâmina de água, as colunas foram interligadas aos frascos de Mariotte, para aplicação da vinhaça. O efluente obtido foi recolhido em recipientes de 100 mL, que foram posicionados na base das colunas, e acondicionados em frascos plásticos para a realização das análises das concentrações de potássio, cálcio e magnésio, por espectrofotometria de absorção atômica (APHA, 1995).

Para o cálculo dos parâmetros das equações de transporte dispersivo-difusivo de solutos no solo (equação 1), utilizando-se as condições iniciais e de contorno adequadas, foi utilizado o programa computacional Disp-1.1, desenvolvido em Delphi (Borland Software Corporation).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C_r + \rho S) = - \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D \frac{\partial C_r}{\partial x} - q C_r \right) \quad (1)$$

em que t é tempo, T;  $\theta$ , teor de água no solo, em base volumétrica, L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>; C<sub>r</sub>, concentração residente ou concentração na solução do solo, M L<sup>-3</sup>;  $\rho$ , massa específica do solo, M L<sup>-3</sup>; S, concentração adsorvida (massa de soluto por unidade de massa do solo); x, distância em relação à superfície do solo, L; D, coeficiente dispersivo-difusivo, L<sup>2</sup> T<sup>-1</sup>; q, densidade de fluxo, L T<sup>-1</sup>.

O desenvolvimento do programa compreendeu a implementação de procedimentos relativos ao cálculo das funções erro e erro complementar, cálculo do produto exp(P) por erfc(y), método de ajuste de curvas, balanço de massa e o desenvolvimento da interface (BORGES JÚNIOR; FERREIRA, 2006). Dessa forma, foram obtidas as curvas de efluentes ajustadas, os fatores de retardamento e coeficientes dispersivo-difusivo dos íons potássio, cálcio e magnésio, tendo sido os dados de entrada as concentrações relativas das amostras oriundas do efluente C/C<sub>0</sub>, sendo C a concentração de solutos no efluente e C<sub>0</sub> a concentração na água residuária, comprimento da coluna, porosidade total, número de volume de poros e fluxo da solução na coluna.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Caracterização da vinhaça de caldo misto**

As características da vinhaça podem variar de acordo com a origem do mosto fermentado, também denominado vinho, que lhe deu origem (mosto de caldo, melação ou misto) e, até mesmo, diariamente, dependendo das condições operacionais do empreendimento.

Os resultados das análises realizadas no efluente utilizado no experimento, mostrados no Quadro 1, confirmam a vinhaça como uma água residuária de grande potencial poluidor, haja vista os elevados valores obtidos para as concentrações de sais, principalmente potássio, cálcio e magnésio; de DBO, DQO, material orgânico, além de pH ácido. Os valores encontrados estão em patamares similares àqueles citados na literatura, bem como daqueles determinados por diversos autores (LONGO et al., 1999; PAULINO, 2002; LYRA, 2003), podendo eventuais diferenças, em determinadas variáveis, serem atribuídas às peculiaridades de cada processo industrial, bem como à matéria-prima e insumos utilizados. Segundo UNESP (2008), a concentração da vinhaça varia de usina para usina e, dentro de cada usina, existem variações nos diversos dias da safra e mesmo num mesmo dia, em função da moagem de diferentes variedades, com diferentes índices de maturação, provenientes de diferentes solos e de seus diferentes níveis de fertilidade.

## 4.2. Alterações físicas e químicas em solos submetidos a diferentes doses de vinhaça proveniente da fabricação de álcool carburante

### 4.2.1. Matéria orgânica e nitrogênio total

Em relação à matéria orgânica, os solos apresentam-se na classe de fertilidade média para o Latossolo Vermelho distrófico (franco-argilo-arenoso) e boa para o Latossolo Vermelho eutroférico (muito argiloso) e Vermelho-amarelo distrófico (argila) (RIBEIRO et al., 1999).

Em geral, solos argilosos apresentam maior riqueza em matéria orgânica (VAN RAIJ, 1991), entretanto, a maior concentração verificada no Latossolo Vermelho-amarelo pode ser atribuída ao fato da amostra ser proveniente de região com cobertura vegetal composta por mata.

De acordo com os resultados apresentados nos Quadros 6 e 7, o conteúdo de matéria orgânica e nitrogênio total foram maiores no LVAd em relação ao LVd e LVef.

Quadro 6 – Valores médios do conteúdo de matéria orgânica nos solos submetidos à aplicação de diferentes doses de vinhaça

Variável	Solo		
	LVad	LVd	LVef
MO ( $\text{dagkg}^{-1}$ )	5,64 ± 0,44 c	2,50 ± 0,17 b	4,26 ± 0,35 a

<sup>1</sup> Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.



Quadro 7 – Valores médios de concentração de nitrogênio total nos solos submetidos à aplicação de diferentes doses de vinhaça

Variável	Solo		
	LVad	LVd	LVef
N <sub>T</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	0,22 ± 0,02 c	0,09 ± 0,04 b	0,15 ± 0,01 a

<sup>1</sup> Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A vinhaça é relativamente rica em MO (DBO de 16.769 mg·L<sup>-1</sup>) e nitrogênio total (733 mg·L<sup>-1</sup>), com isso poderia se esperar aumento no conteúdo de MO e de nitrogênio total dos solos. No entanto, os resultados da análise de variância indicaram que as concentrações de N<sub>T</sub> e MO não apresentaram alterações causadas pelas doses crescentes de vinhaça aplicadas. Numa comparação com os valores médios iniciais dos solos (Quadro 4) observa-se que apenas o LVef apresentou aumento no valor da MO, enquanto que os demais solos (LVAd e LVd) apresentaram tendência de decréscimo da MO.

Segundo Matos (2004), de forma geral, as principais alterações advindas da aplicação de águas residuárias no solo costumam ser químicas, as quais, por sua vez, podem vir a proporcionar alterações físicas no solo. Para que os benefícios da incorporação da matéria orgânica sejam percebidos no solo, torna-se necessária a aplicação de grandes quantidades e com bastante frequência (MATOS, 2006), o que não corresponde às condições do experimento.

Considerando-se que o LVAd foi, dentre os solos avaliados, o de maior fertilidade natural, no qual o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela degradação do material orgânico natural ou adicionado não ficou condicionado por deficiência de nutrientes no solo, suspeita-se que a adição de nutrientes via vinhaça no LVd e LVef tenha proporcionado maior degradação do material orgânico do solo. Embora a vinhaça apresente alta concentração de matéria orgânica, esta se encontra na forma coloidal, o que facilita sua decomposição pelos microrganismos, de forma rápida, com intensa

proliferação bacteriana (SILVA et al., 2007). Assim, dessa intensa atividade microbiana, decorre uma perda acentuada do C orgânico da vinhaça que foi adicionada ao solo, de onde se conclui que não se deve esperar efeitos persistentes do aumento da matéria orgânica devido à adição de vinhaça (GLÓRIA, 1994).

Resultados semelhantes foram obtidos por Sengik (1983), ao aplicar doses de vinhaça (0, 50, 100, 200 e 400 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>), em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo e em um Podzólico Vermelho-Amarelo, incubadas durante 30 dias. O autor constatou aumento no teor de carbono orgânico no LVd, apenas com a dose de 400 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

Em relação ao N<sub>T</sub>, a atuação de microrganismos na sua mineralização e imobilização podem ter contribuído para a invariabilidade na sua concentração nos solos observados. Nas condições do experimento, foi observada formação significativa de fungos na superfície dos solos, além da germinação de ervas, o que também pode ter contribuído para a imobilização de parte do nitrogênio aplicado com vinhaça.

#### **4.2.2. Potássio**

A vinhaça é rica em potássio (2.484 mg.L<sup>-1</sup>), razão porque esse elemento químico é tido como referência na definição de doses a serem aplicadas no solo (GLÓRIA, 1994; RIBEIRO et al., 1999; MATOS, 2004; UNESP, 2008).

Em vista disso, era de se esperar que sua aplicação no solo iria proporcionar aumento na sua disponibilidade no solo.

Conforme a análise de variância, a concentração de potássio foi diferente e apresentou crescimento em seus valores, nos três solos, pela aplicação das doses de vinhaça (Quadro 8), quando comparado à testemunha, à exceção das doses de 40 e 80 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, aplicadas no LVd. Resultado similar também foi observado por Brito et al. (2005), ao aplicar doses de 350 e 700 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de vinhaça em três tipos de solos, após incubação por 30 e 60 dias, quando verificou que a concentração de potássio no solo aumentou em todos os solos, variando com a profundidade e o perfil.

Quadro 8 – Médias das concentrações de potássio trocável nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Potássio trocável (mg.dm <sup>-3</sup> )		
	LVAd	LVd	LVef
0	41,24 ± 0,81	107,50 ± 2,90	175,30 ± 0,95
40	87,76* ± 1,44	93,40 ± 0,00	223,70* ± 1,50
80	93,82* ± 2,75	140,90 ± 21,06	330,40* ± 0,63
160	146,40* ± 5,52	287,20* ± 10,20	416,90* ± 1,49
320	372,66* ± 29,21	565,51* ± 31,31	649,50* ± 0,50

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

Acredita-se que a ocorrência de baixa concentração de K trocável na dose de 40 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, em relação à dose 0 no LVd, deva-se a algum problema na análise ou amostragem, uma vez que o esperado seria um aumento, mesmo que não significativo, como constatado na dose de 80 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

Sengik (1983), ao incubar por 30 dias, amostras de dois solos submetidos a doses de vinhaça equivalentes a 50, 100, 200 e 400 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, também constatou elevação na concentração de bases trocáveis (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>) na camada de 0-10 cm do solo, atribuindo o resultado ao fato de, nessa região, ocorrer maior contato entre as bases aplicadas e o complexo de troca, favorecendo a adsorção nas camadas superficiais dos solos.

Quanto às diferenças de valores relativos à taxa de crescimento das concentrações de potássio trocável nos solos, em relação às mesmas doses aplicadas, conforme mostrado no Quadro 4, observa-se maior crescimento no LVd e LVAd que no LVef.

Para se avaliar a ocupação dos sítios de troca do solo com potássio, calculou-se o Índice de saturação com Potássio, utilizando-se a equação (1):

$$ISK = \frac{[K^+]}{CTC_{pH7}} \times 100 \quad (2)$$

A evolução desse acúmulo de potássio nos solos pode ser evidenciada nas Figuras 1, 2 e 3, onde está apresentado o ISK como função da dose aplicada de vinhaça.

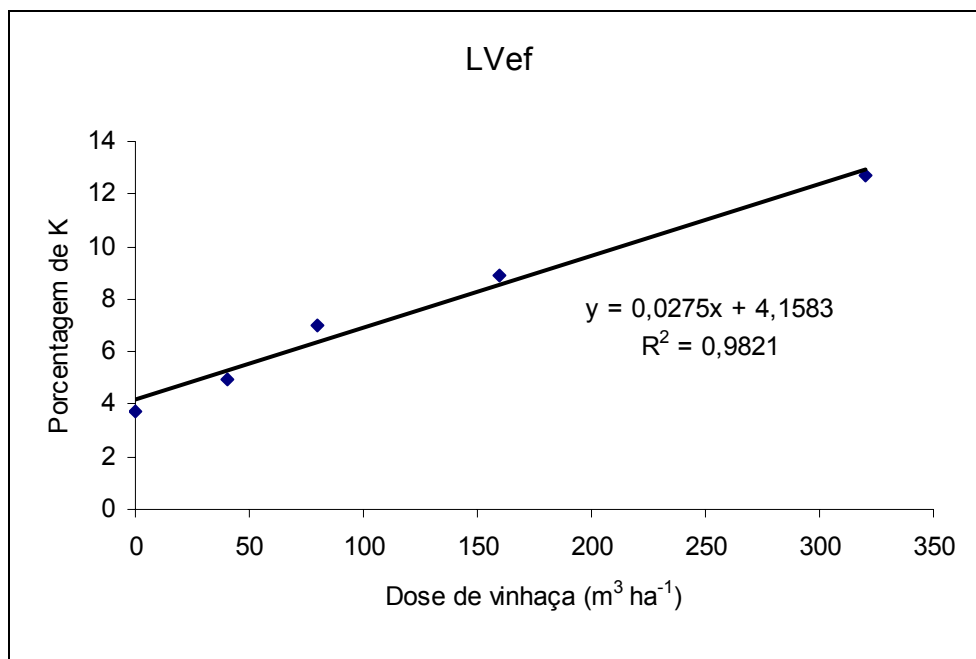


Figura 1 – Índice de saturação de potássio no solo LVef em função de doses aplicadas de vinhaça.

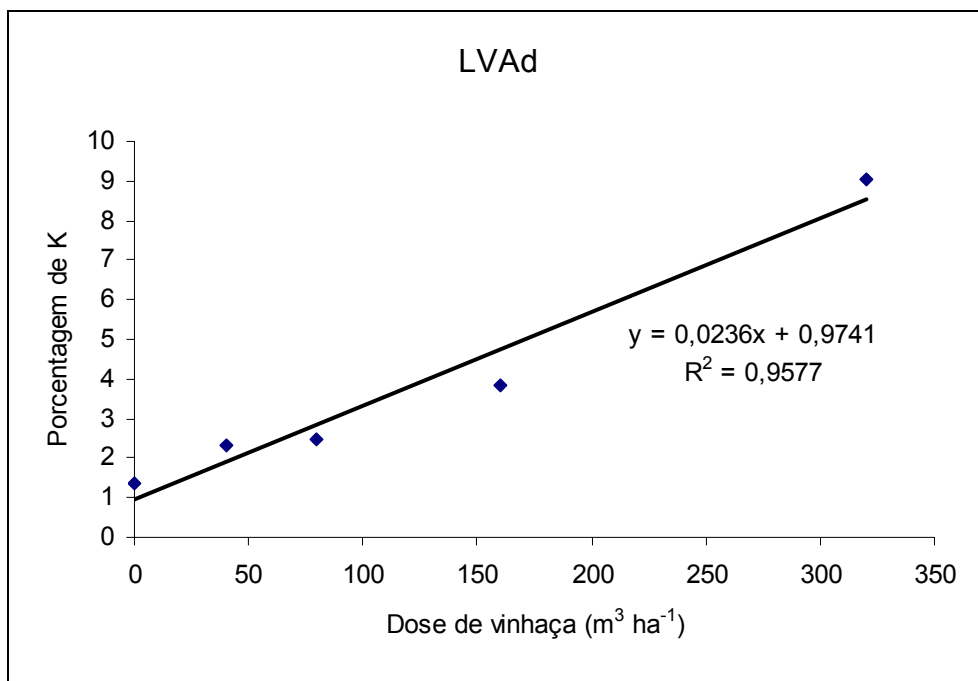


Figura 2 – Índice de saturação de potássio no solo LVAd em função de doses aplicadas de vinhaça.

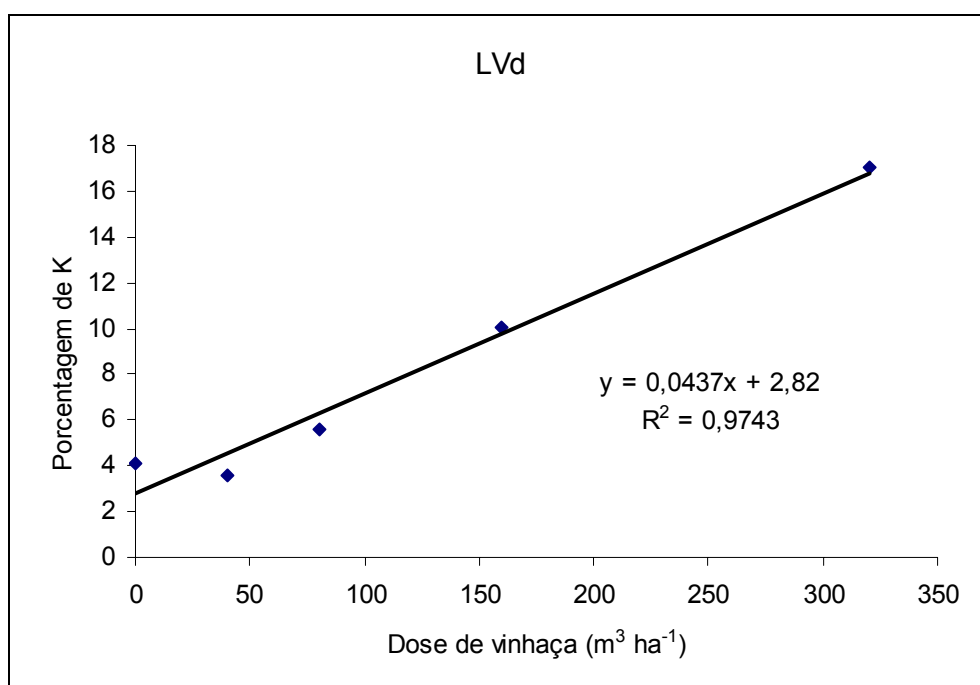


Figura 3 – Índice de saturação de potássio no solo LVd em função de doses aplicadas de vinhaça.

Avaliando as referidas figuras, evidencia-se uma situação de alerta no que concerne à aplicação da vinhaça sem qualquer forma de controle, uma vez que, já a partir da dose de  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , a menor dentre todas, verifica-se, no LVef, que o potássio apresenta índice de saturação superior a 5% da CTC potencial do solo, limite este considerado de equilíbrio, no que se refere à fertilidade de solos produtivos e equilibrados do ponto de vista de nutrição de plantas (RIBEIRO et al., 1999). Já para o LVAd e LVd, tal condição é observada após a aplicação de  $170$  e  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , respectivamente.

Deve-se lembrar que essas doses de vinhaça correspondem àquelas a serem aplicadas em áreas novas com as quais eleva-se a participação de potássio trocável no complexo de troca dos solos, podendo ser entendida como adubação corretiva.

A adubação potássica com a vinhaça para reposição das necessidades da cultura, utilizando-se a recomendação de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , mencionada por Kiehl (1985), ou outras estabelecidas por Ribeiro et al. (1999), baseadas na concentração presente de potássio trocável no solo e nas produtividades esperadas para a cultura de cana-de-açúcar, será complementar, o que deverá aumentar a lâmina a ser aplicada no primeiro ano. Os anos subseqüentes deverão receber apenas a lâmina de reposição de K.

O valor de reposição de potássio (adubação de manutenção), baseando-se na recomendação da aplicação de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  corresponde à aplicação de  $67 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  de vinhaça.

Comparando-se os valores de declividade das curvas, verifica-se que a taxa de ocupação dos sítios de troca com K com a aplicação de vinhaça foi maior no LVd, o que está diretamente relacionado à sua textura. O LVd é um solo mais arenoso e, como tal, apresenta menor poder tampão para o K.

Um acúmulo de potássio no solo, ocupando mais de 5% dos seus sítios de troca, propicia condições para o deslocamento do cátion no mesmo, bem como proporciona o deslocamento de cálcio e magnésio, com conseqüente lixiviação deles para camadas mais profundas no perfil do solo, situação que, dependendo das características e condições do local, pode causar contaminação das águas subterrâneas, segundo a Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA (2008), pela aplicação da vinhaça em

final de safra, próximo à estação chuvosa, em solos com baixos valores de CTC; na estação seca em que a absorção de nutrientes pelas plantas é baixa, permanecendo os mesmos na solução do solo suscetíveis à ação de precipitações intensas no início da estação chuvosa.

Ressalta-se que a Deliberação Normativa COPAM n.º 12/86 estabelece em  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  a taxa de aplicação para vinhaça proveniente de caldo misto, independente das características do solo, o que corresponderia a uma ocupação de potássio, nos sítios de troca, equivalente a 12,41%, 8,05% e 15,93%, respectivamente, do LVef, LVAd e LVd. Essa condição é indicadora de não sustentabilidade técnica e ambiental da prática nessas classes de solo. Considerando que essas classes são as dominantes na região de avanço no cultivo da cana-de-açúcar e da produção de álcool no Estado de Minas Gerais, fica clara a inadequabilidade da legislação ora em vigor para nortear a aplicação de vinhaça no solo. Entende-se ser urgente que se faça uma revisão da legislação, de tal forma a que, tal como proposto pela CETESB, as doses corretivas a serem aplicadas em cada área sejam definidas com base num limite máximo de saturação do complexo de troca com potássio. Isso proporcionaria, além de resguardar a qualidade do solo e das águas subterrâneas, maior facilidade para monitoramento das áreas receptoras de vinhaça, pois, por meio de simples acompanhamento de análises de rotina do solo, poder-se-ia avaliar se a aplicação segue os padrões estabelecidos.

#### **4.2.3. Cálcio e magnésio**

A vinhaça contém quantidades significativas de Ca ( $1340 \text{ mg L}^{-1}$ ) e Mg ( $473 \text{ mg L}^{-1}$ ), o que indica que a sua aplicação no solo pode aumentar a disponibilidade desses nutrientes no meio.

No Quadro 9 estão apresentados os valores de concentração de Ca+Mg em função da dose de vinhaça aplicada.

Numa análise geral, os aumentos verificados podem ser creditados à concentração desses macronutrientes na vinhaça, todavia, em proporções diferentes, de acordo com o tipo de solo.

Quadro 9 – Médias das concentrações de Ca+Mg trocáveis nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Cálcio + Magnésio trocável (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )		
	LVAd	LVd	LVef
0	0,32±0,00	3,78±0,01	6,30±0,01
40	0,69*±0,20	3,62±0,23	6,30±0,11
80	0,92*±0,05	3,55±0,21	6,80*±0,25
160	0,99*±0,02	4,02±0,16	7,40*±0,10
320	1,39*±0,02	4,58*±0,23	8,12*±0,00

Médias seguidas pela significância do teste de Dunnet (\*), em nível de 5% de probabilidade, tomando-se a dose testemunha como referência.

Na análise de variância efetuada para a concentração de Ca+Mg no LVef, verificou-se que a concentração desses macronutrientes não superou à da menor dose aplicada. No solo LVAd, todas as doses aplicadas de vinhaça causaram aumento na concentração de cálcio e magnésio, fato que não ocorreu nos outros solos. Suspeita-se que o baixo poder tampão e as baixas concentrações naturais de Ca+Mg no LVAd foram as razões para o ocorrido. Apenas maiores doses de vinhaça foram capazes de aumentar a concentração de Ca+Mg trocáveis no LVd e LVef.

Com o objetivo de se avaliar a ocupação dos sítios de troca do solo com cálcio e magnésio, bem como a evolução desse acúmulo, também foi realizada análise de regressão para essas variáveis, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 4, 5 e 6.



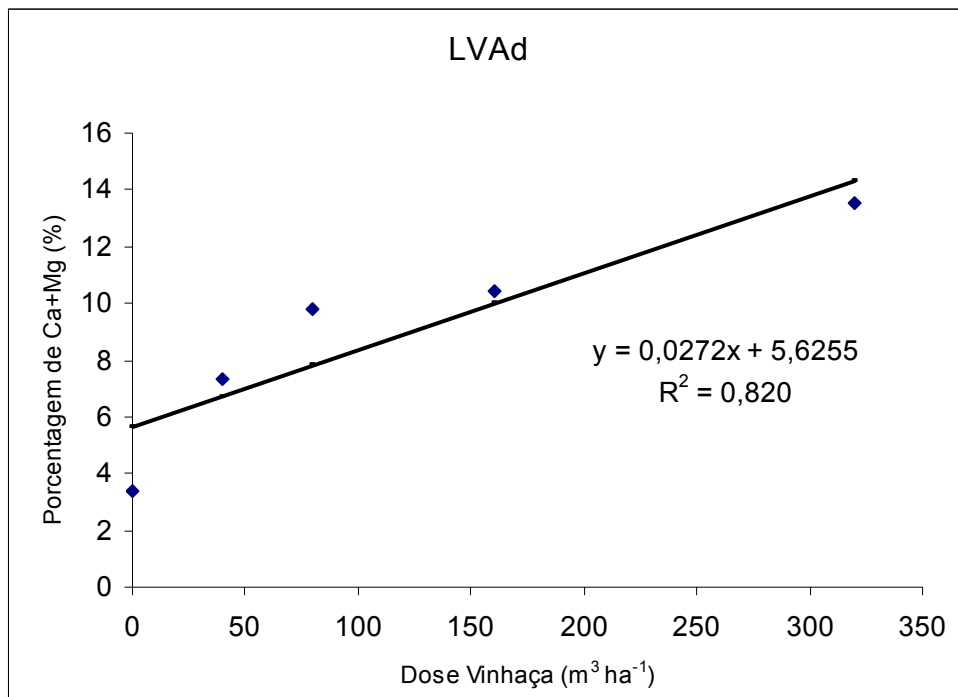


Figura 4 – Índice de saturação de Ca+Mg no solo LVAd em função de doses aplicadas de vinhaça.

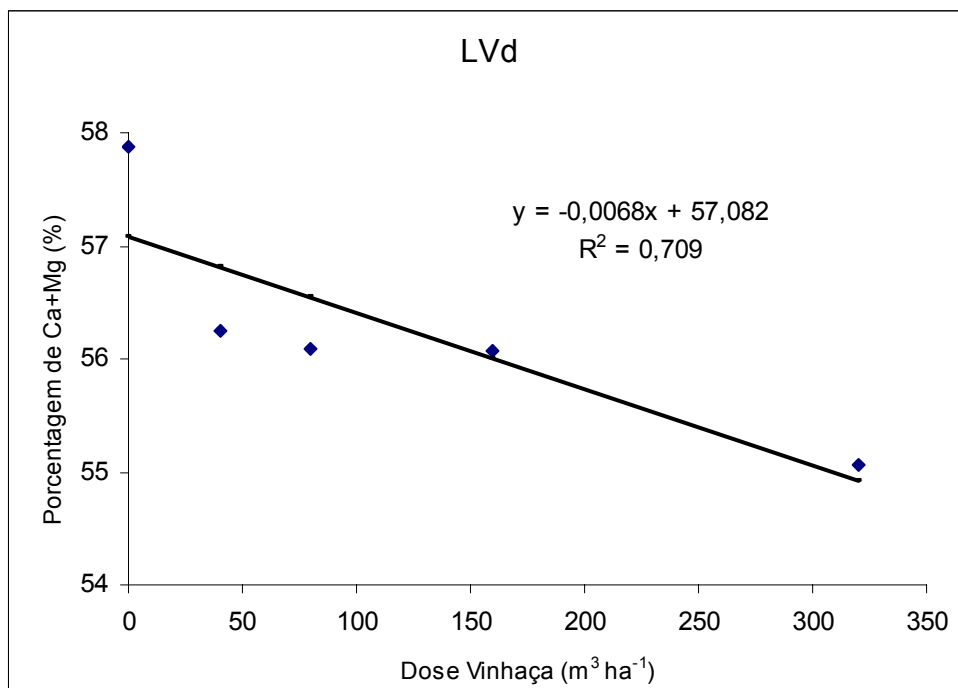


Figura 5 – Índice de saturação de Ca+Mg no solo LVd em função de doses aplicadas de vinhaça.

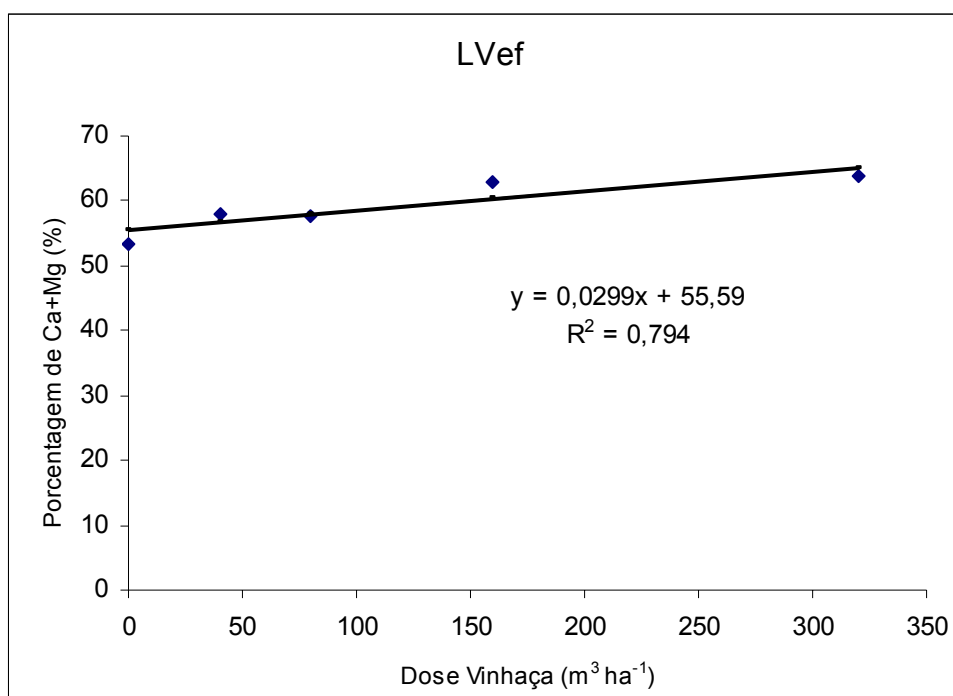


Figura 6 – Índice de saturação de Ca+Mg no solo LVeF em função de doses aplicadas de vinhaça.

A CFSEMG (RIBEIRO et al., 1999) recomenda, por exemplo, para a cultura da cana-de-açúcar, uma concentração máxima no solo de Ca+Mg de  $3,5 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$ , assim como um valor máximo de saturação por bases da CTC a pH7 correspondente a 60%, condições a partir das quais a absorção de outros nutrientes pela cultura fica prejudicada. De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que essas condições estão presentes nos solos LVd e LVeF, cabendo ressaltar que estes já apresentavam altas concentrações iniciais de Ca+Mg.

#### 4.2.4. Sódio

A concentração de Na na vinhaça é relativamente baixa ( $10 \text{ mg.L}^{-1}$ ) o que deveria proporcionar pequeno efeito na sua concentração no solo. Apesar disso, foram significativos os efeitos das doses correspondentes a 40 e 320  $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ , caracterizadas como elevação da concentração desse cátion no LVeF,

e 40 e 80 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>, caracterizada como um decréscimo da concentração no LVd, não tendo sido verificada qualquer alteração em relação ao LVAd (Quadro 10).

Quadro 10 – Médias das concentrações de sódio trocável nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Sódio trocável (mg·dm <sup>-3</sup> )		
	LVAd	LVd	LVef
0	4,00 ±0,00	4,00 ±0,00	2,80 ±0,00
40	4,00 ±0,00	2,00* ±0,00	3,80* ±0,00
80	4,00 ±0,00	2,00* ±0,00	2,80 ±0,00
160	4,00 ±0,00	3,33 ±1,15	2,80 ±0,00
320	4,00 ±0,00	4,00 ±0,00	3,80* ±0,00

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

No entanto, essas diferenças significativas, em função inclusive da falta de explicação lógica para o fenômeno, devem ser desconsideradas tendo em vista que as concentrações de sódio são muito baixas, podendo ser decorrentes de erros nas análises ou de diferenças normais decorrentes da própria variabilidade do solo.

#### 4.2.5. pH

Apesar de a vinhaça apresentar pH ácido (3,8), as diferentes doses de vinhaça aplicadas não causaram alteração significativa no pH do LVef, que permaneceu com acidez fraca, com predominância de cargas negativas. Em relação ao LVAd, doses acima de 40 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> provocaram redução no valor do pH, de uma acidez média para elevada, mantendo-se com saldo favorável de cargas negativas. O LVd também apresentou balanço favorável de cargas negativas, tendo sido todas as doses aplicadas significativas no sentido de elevar a acidez das amostras de fraca para média.

Quadro 11 – Médias dos índices de pH em água e em KCl nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	pH+H <sub>2</sub> O			pH <sub>KCl</sub>		
	LVAd	LVd	LVef	LVAd	LVd	LVef
0	5,20 ±0,17	6,07 ±0,05	6,20 ±0,24	3,89 ±0,10	4,69 ±0,07	5,45 ±0,11
40	5,05 ±0,06	5,76* ±0,10	6,00 ±0,04	3,90 ±0,02	4,94* ±0,16	5,35 ± 0,06
80	4,90* ±0,03	5,70* ±0,07	6,10 ±0,16	3,90 ±0,01	5,06* ±0,08	5,26* ±0,02
160	4,80* ±0,05	5,66* ±0,06	6,20 ±0,07	3,91 ±0,02	5,19* ±0,03	5,37 ±0,04
320	4,72* ±0,01	5,79* ±0,05	6,10 ±0,04	3,94 ±0,02	5,36* ±0,03	5,42 ±0,06

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

As diferentes reações dos três tipos de solos às doses equivalentes aplicadas podem ser atribuídas à textura de cada um, sendo que solos mais argilosos ou com argila de maior atividade ou com maiores teores de matéria orgânica possuem maior poder tampão do que solos mais arenosos ou argilosos de baixa atividade ou que tenham menores teores de matéria orgânica (CAMARGOS, 2008).

O LVef muito argiloso, utilizado neste experimento, em razão de possuir considerável conteúdo de matéria orgânica, apresentou maior poder tampão, justificando sua resistência em ter o pH alterado, conforme constatado. Os decréscimos no valor do pH ocorridos no LVAd e no LVd, devem-se ao menor poder tampão destes solos.

Apesar de ter sido verificado decréscimo no valor de pH<sub>água</sub>, este é melhor indicador, tendo em vista que a vinhaça é possuidora de alta concentração de K, o que mascara os resultados de pH<sub>KCl</sub>. Sabe-se que essa acidificação do solo é temporária e aumento de pH pode ser observado posteriormente. Segundo UNESP (2008), após a aplicação da vinhaça no solo, há acidificação até os primeiros 15 dias, e com o passar do tempo, há elevação do pH. Isso se deve à reação básica de cátions (Na, K, Ca e Mg) disponibilizados pela vinhaça no solo.

#### 4.2.6. Condutividade elétrica

A vinhaça apresenta elevada condutividade elétrica ( $8,8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), o que indica possuir alta concentração iônica (Ca, Mg e K, principalmente). Dessa forma, ao ser aplicada no solo, tende a aumentar a sua concentração iônica e, conseqüentemente, a condutividade elétrica (CE).

No Quadro 12 estão apresentados os valores médios de CE nos solos em função da dose de vinhaça aplicada. Em todos os solos, bem como em todas as doses aplicadas, a condutividade elétrica aumentou de forma linear e crescente, resultado este que pode ser atribuído à elevada concentração iônica (Ca, Mg e K) na vinhaça.

Quadro 12 – Médias da condutividade elétrica nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	CE ( $\text{dS m}^{-1}$ )		
	LVA <sub>d</sub>	LV <sub>d</sub>	LV <sub>ef</sub>
0	0,08	0,12	0,07
40	0,14*	0,20	0,18*
80	0,22*	0,32*	0,27*
160	0,34*	0,55*	0,39*
320	0,65*	0,84*	0,69*

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

Conforme descrito em Material e Métodos, a condutividade elétrica nas amostras de solo, foi determinada utilizando-se água destilada na proporção 1:2,5, o que deve ser considerado na comparação com resultados obtidos por outros autores, os quais utilizaram o extrato da pasta de saturação do solo, o que dá proporção próxima de 1:1, o que resulta em valores maiores que os obtidos neste trabalho.

Lo Mônico (2005), ao aplicar, no solo cultivado com cafeeiro, diferentes doses de água residuária da lavagem e descascamento de frutos do cafeeiro (ARC), na quais o potássio é macronutriente presente em maior concentração, também constatou alteração da condutividade elétrica ao longo do perfil do solo, tendo obtido os maiores valores, nos primeiros 20 cm.

Ao aplicar diferentes doses de manipueira em três diferentes tipos de solos, Melo (2004) igualmente constatou aumento linear com as doses crescentes em dois deles.

#### 4.2.7. Acidez trocável

No tocante à acidez trocável dos solos, foram observadas alterações no LVAd, apenas na maior dose aplicada, e no LVd nas doses de 40 e 80 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

Quadro 13 – Médias da acidez trocável nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )		
	LVAd	LVd	LVef
0	1,51 ±0,04	0,31 ±0,03	0,09 ±0,01
40	1,38 ±0,06	0,18* ±0,00	0,10 ±0,04
80	1,38 ±0,06	0,18* ±0,00	0,06 ±0,00
160	1,44 ±0,11	0,22 ±0,04	0,03 ±0,03
320	1,17* ±0,04	0,25 ±0,10	0,04 ±0,00

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

Embora se sabe que o material orgânico incorporado possa ser responsável pela complexação do Al<sup>3+</sup>, os resultados encontrados não estão muito consistentes para poder atribuir as diminuições na concentração de Al<sup>3+</sup> à aplicação de vinhaça.

#### 4.2.8. Acidez potencial

Ao contrário do que foi obtido em relação à acidez trocável, houve significativa redução na acidez potencial, do LVAd e LVef, coincidentemente os solos mais argilosos.

A acidez potencial foi reduzida no LVef e LVAd, exceção observada em relação à dose de  $40 \text{ m}^{-3}\cdot\text{ha}^{-1}$ , aplicada no LVA, que manteve o valor dessa variável inalterado (Quadro 14).

Quadro 14 – Médias da acidez potencial nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada ( $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	H + Al ( $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ )		
	LVAd	LVd	LVef
0	8,85 $\pm$ 0,13	2,47 $\pm$ 0,17	5,01 $\pm$ 0,11
40	8,57 $\pm$ 0,17	2,58 $\pm$ 0,17	4,16* $\pm$ 0,06
80	8,22* $\pm$ 0,17	2,42 $\pm$ 0,07	4,13* $\pm$ 0,19
160	8,20* $\pm$ 0,07	2,42 $\pm$ 0,07	3,29* $\pm$ 0,04
320	7,95* $\pm$ 0,26	2,31 $\pm$ 0,17	3,00* $\pm$ 0,22

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

Já para o LVd, nenhuma das doses aplicadas provocou alterações na acidez potencial das amostras.

#### 4.2.9. Capacidade de troca catiônica potencial

Conforme a análise de variância, as alterações na CTC potencial foram significativas nas maiores doses para o LVd e para a dose de  $320 \text{ m}^{-3}\cdot\text{ha}^{-1}$  em relação ao LVef. Em relação ao LVAd, os efeitos de todas as doses aplicadas foram significativos no sentido de aumentar o valor da CTC, em relação ao tratamento testemunha (Quadro 15).

Quadro15 – Médias da CTC potencial nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	CTC a pH 7 ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )		
	LVA <sub>d</sub>	LV <sub>d</sub>	LV <sub>ef</sub>
0	9,31 ±0,12	6,54 ±0,17	11,71 ±0,05
40	9,50* ±0,08	6,44 ±0,38	11,27 ±0,07
80	9,40* ±0,14	6,33 ±0,19	11,76 ±0,41
160	9,58* ±0,05	7,17* ±0,26	11,74 ±0,13
320	10,29* ±0,31	8,32* ±0,17	12,81* ±0,22

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

Como não houve aumento na acidez potencial, mas sim decréscimo, o aumento na CTC potencial poderia ser creditado, em grande parte, à adição de bases ao solo.

#### 4.2.10. Capacidade de troca catiônica efetiva

Apenas para as doses de 40 e 80  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , aplicadas no LV<sub>d</sub>, os efeitos da aplicação da vinhaça não foram significativos, tendo ocorrido aumento dessa variável, proporcional às doses aplicadas, nas demais amostras de solos (Quadro 16).

Da mesma forma como discutido para a  $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ , os aumentos na  $\text{CTC}_{\text{ef}}$  deveram-se ao aporte de bases, proporcionado pela vinhaça, ao solo.



Quadro16 – Médias da CTC efetiva nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	CTC <sub>Efet.</sub> ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ )		
	LVAd	LVd	LVef
0	1,98 ±0,04	4,38 ±0,04	6,80 ±0,00
40	2,31* ±0,26	4,04 ±0,23	7,22* ±0,13
80	2,56* ±0,05	4,09 ±0,24	7,69* ±0,25
160	2,82* ±0,12	4,97* ±0,16	8,47* ±0,09
320	3,51* ±0,07	6,26* ±0,28	9,85* ±0,00

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

#### 4.2.11. Argila dispersa em água

Conforme os resultados da análise de variância, a argila dispersa em água (ADA) foi afetada, de forma decrescente, em todas as doses aplicadas no LVAd, mantendo-se inalterada para as demais situações, à exceção da menor dose aplicada ao LVef que provocou aumento dessa variável (Quadro 17). Esses resultados corroboram os encontrados por Almeida Neto (2007) que encontrou decréscimo na ADA em LVAd, quando recebeu soluções salino-sódicas com diversas composições químicas. No LVef e LVd praticamente não foram observados efeitos da aplicação da vinhaça na ADA, possivelmente como consequência do aumento da concentração iônica.

Em experimento similar, utilizando aplicação das doses de ARC, Garcia (2003) obteve resultados semelhantes para as amostras de um latossolo, atribuindo a diminuição na proporção da argila dispersa à predominância do efeito do cálcio e magnésio sobre a maior concentração do potássio.

Quadro 17 – Médias da porcentagem de argila dispersa nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	Argila dispersa (%)		
	LVA <sub>d</sub>	LV <sub>d</sub>	LV <sub>ef</sub>
0	14,67 ±0,58	3,33 ±0,58	10,00 ±0,00
40	10,67* ±0,58	3,33 ±0,58	11,33* ±0,58
80	11,33* ±0,58	3,67 ±0,58	10,67 ±0,58
160	12,00* ±1,73	3,67 ±0,58	9,67 ±0,58
320	10,33* ±0,58	2,33 ±0,58	10,33 ±0,58

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

#### 4.2.12. Capacidade de campo

O efeito das doses de vinhaça aplicadas aos solos foi significativo no sentido de reduzir a capacidade de retenção de água nas maiores doses aplicadas aos LVA<sub>d</sub> e LV<sub>d</sub> e nas doses de 80 e 160  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  para o LV<sub>ef</sub> (Quadro 18).

Embora matéria orgânica tenha sido acrescentada aos solos, devido a aplicação de vinhaça, o que poderia contribuir para melhorar sua capacidade de retenção de água, a quantidade aplicada não foi suficiente para provocar essa melhoria.

Quadro 18 – Médias das capacidades de campo nos solos submetidos à aplicação de vinhaça

Dose de vinhaça aplicada (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Capacidade de campo (%)		
	LVA <sub>d</sub>	LV <sub>d</sub>	LV <sub>ef</sub>
0	37,72 ±0,47	17,36 ±0,40	41,97 ±0,74
40	36,53 ± 0,21	16,95 ±0,61	40,92 ±0,80
80	37,22 ±0,92	16,52 ±0,52	39,77* ±1,13
160	35,96 ±0,58	16,22 ±0,73	38,54* ±0,94
320	34,77* ±1,17	15,56* ±0,68	40,26 ±0,73

Médias que diferem significativamente da testemunha em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet (\*).

#### 4.3. Curvas de efluentes de potássio, cálcio e magnésio dos solos

Os resultados obtidos no segundo ensaio, em colunas de lixiviação, são apresentados nos Quadros 19 e 20 e Figuras 4 a 12.

Quadro 19 – Características obtidas no ensaio de deslocamento miscível utilizando vinhaça aplicada em colunas de solos, em condições de laboratório

Características	LVA <sub>d</sub>	LV <sub>d</sub>	LV <sub>ef</sub>
Fluxo (cm h <sup>-1</sup> )	0,99 – 1,36	0,33 – 1,06	0,11 – 0,21
Vel. de avanço (cm h <sup>-1</sup> )	1,65 – 2,27	0,72 – 2,30	0,22 – 0,41

As curvas de efluente com cálcio, potássio e magnésio estão apresentadas nas Figuras de 4 a 12, obtidas pelo ajustamento teórico aos dados experimentais, usando o programa computacional DISP.

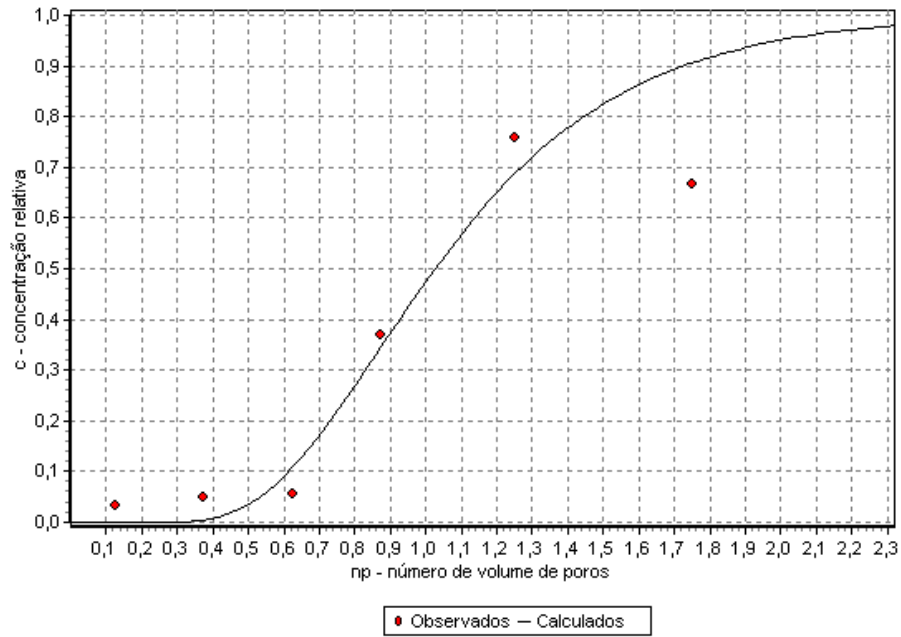


Figura 7 – Curva de efluente para concentração de cálcio no LVeF.

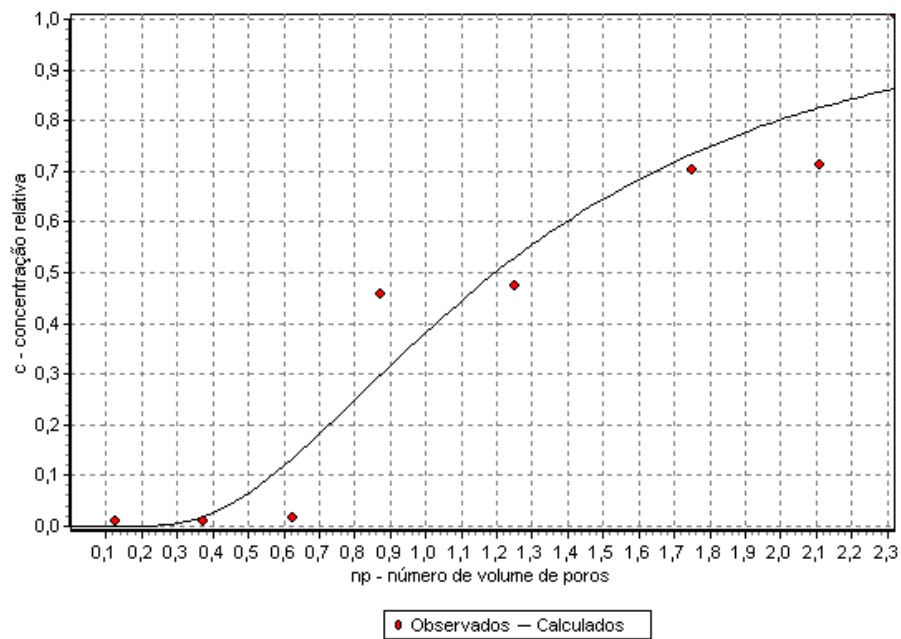


Figura 8 – Curva de efluente para concentração do potássio no LVeF.

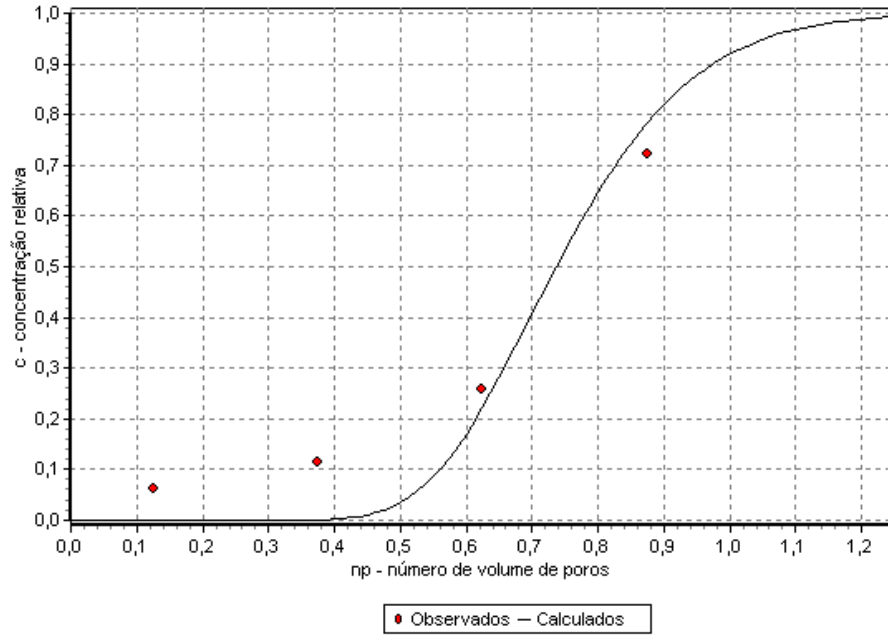


Figura 9 – Curva de efluente para concentração do magnésio no LVEf.

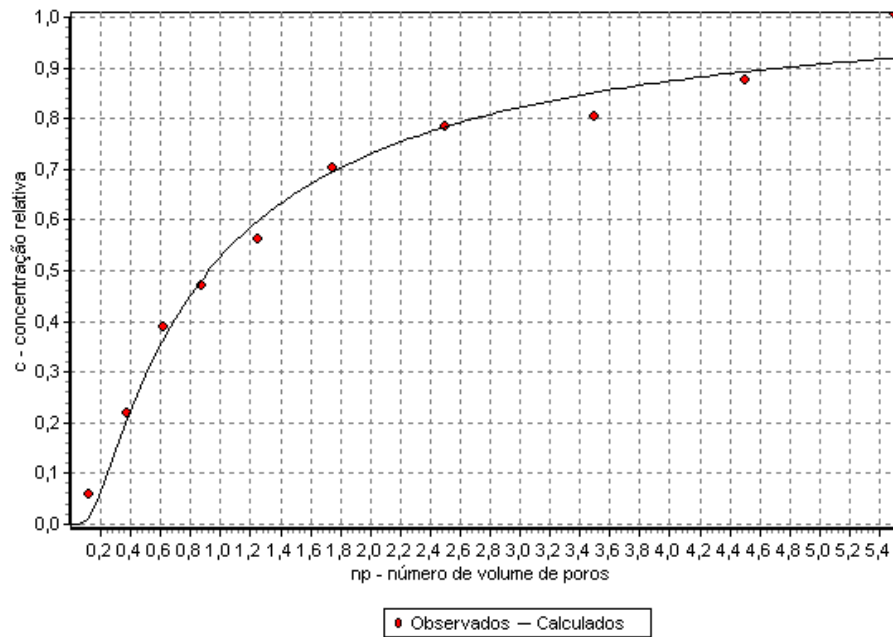


Figura 10 – Curva de efluente para concentração do cálcio no LVAd.

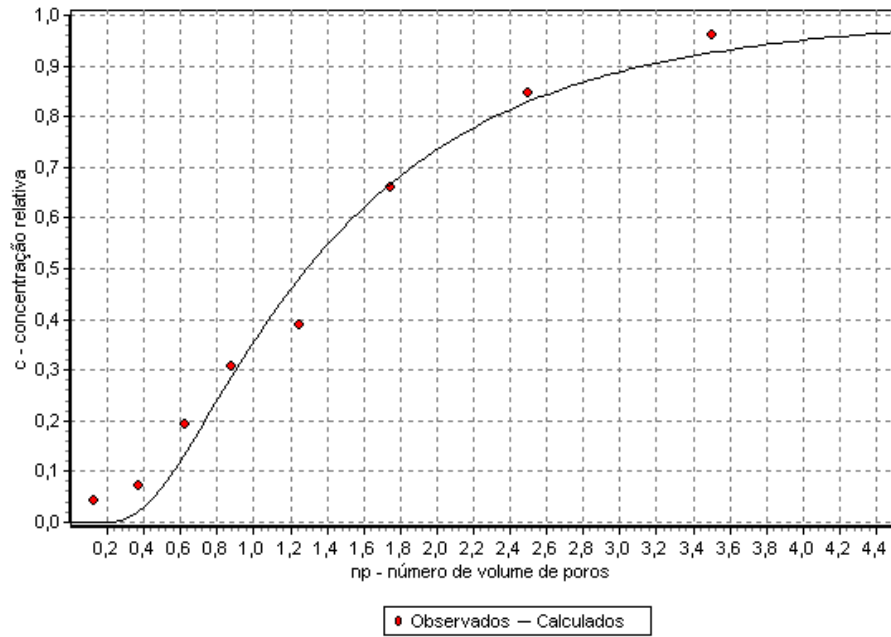


Figura 11 – Curva de efluente para concentração do potássio no LVAd.

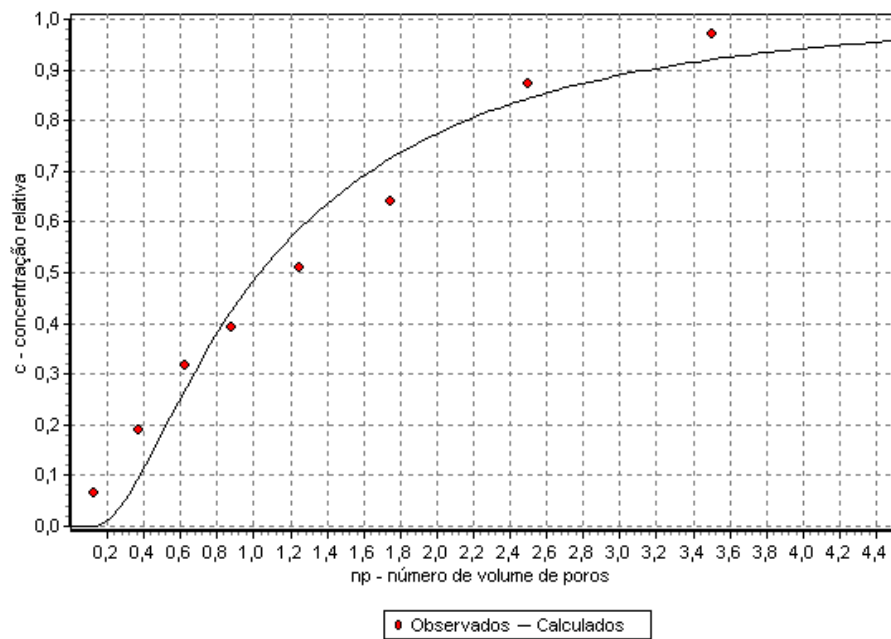


Figura 12 – Curva de efluente para concentração de magnésio no LVAd.

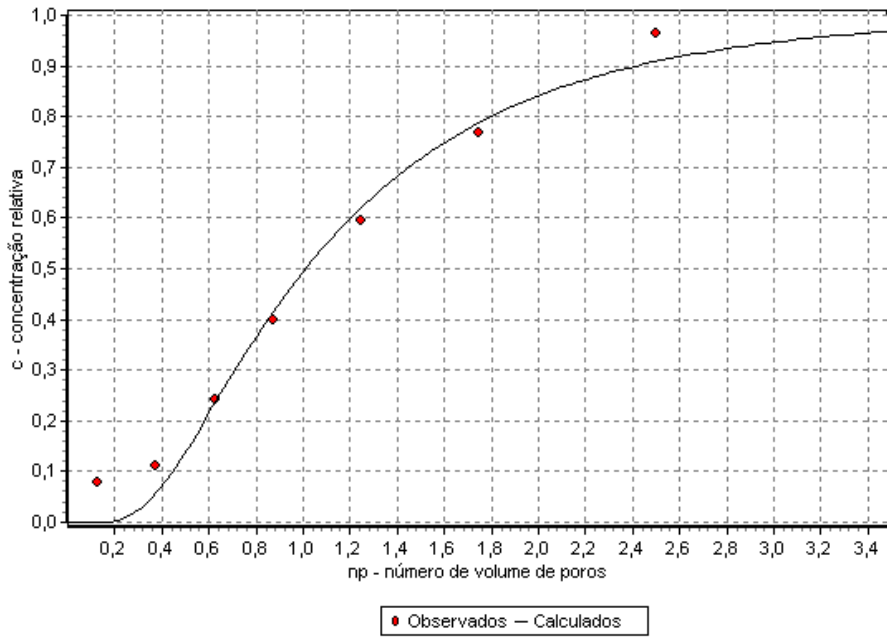


Figura 13 – Curva de efluente para concentração de cálcio no LVd.

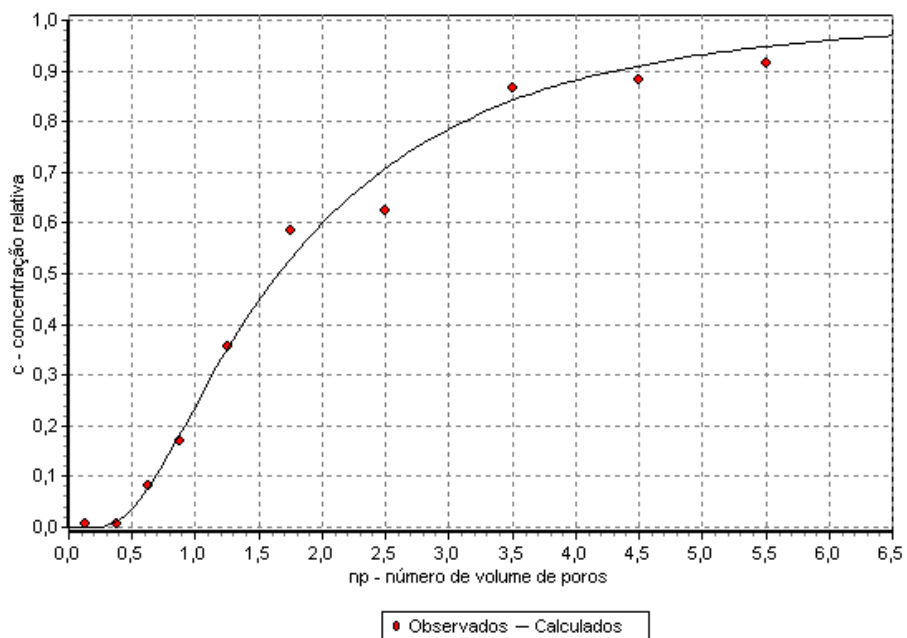


Figura 14 – Curva de efluente para concentração de potássio no LVd.

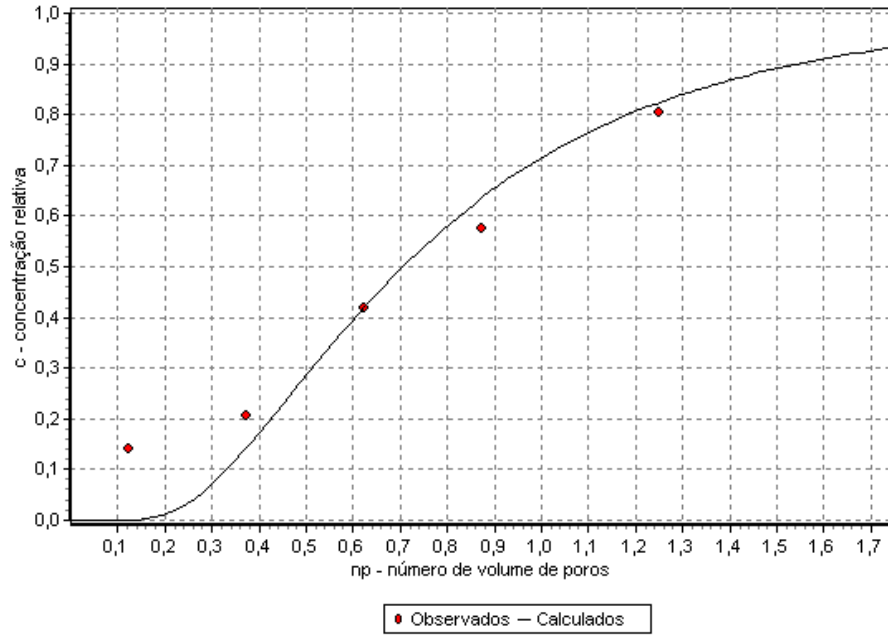


Figura 15 – Curva de efluente para concentração de magnésio no LVd.

No Quadro 20, estão apresentados os fatores de retardamento e coeficientes dispersivos-difusivos, obtidos no programa DISP, para os íons K, Ca e Mg, relativos aos três solos.

Quadro 20 – Valores médios do fator de retardamento (fR) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) dos íons potássio, cálcio e magnésio

Solo	Variáveis					
	K		Ca		Mg	
	fR	D	fR	D	fR	D
LVAd	1,63	6,76	1,98	41,46	1,49	12,67
LVd	2,17	3,44	1,27	9,01	0,85	15,05
LVef	1,43	1,22	1,11	0,54	0,75	0,15

Nota: D em  $\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$ .



De maneira geral, os resultados obtidos indicam grande mobilidade desses elementos nos solos. Os maiores valores para os fatores de retardamento, que são indicativos de uma maior retenção de íons, foram observados no LVAd, seguido pelo LVd e LVef.

O fato de terem ocorrido maiores valores de  $f_R$  no LVAd pode ser creditado ao maior conteúdo de matéria orgânica presente neste solo, além disso, o solo possui alto teor de argila ( $52 \text{ dag.kg}^{-1}$ ), o que lhe confere maior poder de adsorção iônica. Em relação ao LVef, neste solo foram encontrados os menores fatores de retardamento para todos os íons analisados, sendo que os valores para cálcio e potássio, embora acima da unidade, estão muito próximos a esta, caracterizando baixa interação solo-soluto ou forte deslocamento proporcionado por outros cátions (principalmente K) adicionados ao solo com a vinhaça. Quanto ao magnésio, o fator de retardamento abaixo da unidade indica não ter havido interação do soluto com a fração coloidal do solo ou fraco poder competidor deste cátion pelos sítios de troca do solo.

Fator de retardamento menor que 1,0 indica meio com forte competição iônica, havendo dessorção de cátions do complexo de troca. Isso claramente ocorre com o Mg nos solos LVd e LVef.

Registra-se, em relação ao LVef, que o fluxo do efluente ocorreu, no máximo, até a passagem de 2,3 volumes de poros, provavelmente devido ao entupimento dos poros, ocasionado pela elevada concentração de sólidos totais presente na vinhaça.

Quanto a ter sido obtido mais baixo  $f_R$  no LVef para todos os cátions, suspeita-se que isto esteja associado a sua condição inicial de possuir maior saturação por bases. Com a aplicação da vinhaça, o potássio em excesso passou a deslocar bases (Ca, Mg e K) do complexo de troca em maior proporção que os solos de menor saturação por bases. Assim, possibilitou mais rápida lixiviação dos mesmos. Ambas as situações são confirmadas pelo deslocamento para a esquerda das curvas desses efluentes, o que, na prática, pode ser interpretado como grande possibilidade de lixiviação desses cátions, com tendência de contaminação de águas subterrâneas, caso a aplicação de vinhaça ocorra de forma exagerada e contínua.

No tocante ao LVd, o fator de retardamento do cálcio ficou próximo da unidade, o que pode ser creditado ao deslocamento desse cátion para a

solução do solo, situação que também caracteriza risco de aporte desse elemento às águas subterrâneas.

Quanto ao LVAd, este apresentou maior interação solo-soluto, condição que pode ser creditada ao maior conteúdo de matéria orgânica apresentado por este, em relação aos demais, conforme mostrado no Quadro 20.

## 5. CONCLUSÕES

1. Não houve alteração no conteúdo de matéria orgânica e na concentração de nitrogênio total com aplicação das doses de vinhaça, nos três solos analisados.
2. A concentração de potássio, cálcio e magnésio trocáveis aumentou com as doses de vinhaça aplicadas nos três solos.
3. O pH não alterou no LVef e, de maneira geral, decresceu nos demais solos com as doses de vinhaça. A condutividade elétrica aumentou com as doses de vinhaça, nos três solos.
4. A acidez trocável decresceu com as menores doses no LVd e na maior dose no LVAd, e não se alterou nas demais condições. A acidez potencial decresceu com a doses de vinhaça aplicadas no LVef , a partir da menor dose, no LVAd e permaneceu inalterada no LVd.
5. A CTC potencial aumentou no LVAd e, no LVd e LVef, somente com as maiores doses. Em relação à CTC efetiva, ocorreu aumento com as doses aplicadas nos três solos, sendo tal efeito, no LVd, observado apenas com aplicação das duas maiores doses.
6. A argila dispersa em água decresceu no LVAd, mantendo-se inalterada nas demais situações, à exceção da menor dose aplicada ao LVef que provocou aumento dessa variável.
7. A capacidade de retenção de água reduziu nas maiores doses aplicadas ao LVAd e LVd e nas doses de 80 e 160 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> no LVef.

8. Os maiores valores para os fatores de retardamento, portanto, uma maior retenção de íons, foram observados no LVAd, seguido pelo LVd e LVef. O magnésio apresentou fator de retardamento abaixo da unidade para o LVd e LVef.
9. Com base nos valores obtidos de concentração de potássio trocável com aplicação de vinhaça nos solos estudados, recomenda-se reavaliação da legislação ambiental vigente, relativa ao assunto, tendo em vista que existe grande risco para a qualidade do solo e das águas subterrâneas caso os valores limites estabelecidos na DN COPAM n.º 012/86 continuem a ser praticados nas doses de vinhaça aplicadas.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS – APTA. Disponível em: <[www.apta.sp.gov.br/polos](http://www.apta.sp.gov.br/polos)>. Acesso em: 12 ago. 2008.

AGUIAR, M.A. **Incorporação da vinhaça ao solo**: efeitos sobre as características de resistência do material obtido. 2002. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas, SP.

ALMEIDA NETO, O.B. **Dispersão da argila e condutividade hidráulica em solos com diferentes mineralogias, lixiviados com soluções salino-sódicas**. 2007. 83 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ALMEIDA, B.A.D.L.; BARRETO, G.F.B.; GONÇALVES, C.M.N. Resíduos da agroindústria canaveira no estado de Minas Gerais: usos e conservação ambiental. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 28, p. 96-100, jul./ago. 2007.

ALVAREZ, V.H. **Caracterização química do solo**. Viçosa, UFV, s.d. 77 p. (Mimeogr.).

ALVES, T.A. **Perspectivas do setor sucroalcooleiro na região do Alto Noroeste Paulista**: caracterização da cana-de-açúcar. Ilha Solteira, 2004. 24 p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19.ed. New York: APHA, WWA, WPCR, 1995.

BANCO DO NORDESTE – BDN. **Manual de impactos ambientais: orientações básicas sobre aspectos ambientais de atividades produtivas.** Fortaleza, 1999. 297 p.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A.; BERTON, R.S. **Utilização de lodo de esgoto na agricultura.** Disponível em: <[www.iac.sp.gov.br](http://www.iac.sp.gov.br)>. Acesso em: 29 abr. 2008.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; FERREIRA, P.A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 604-611, 2006.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W.A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais.** São Paulo: CETESB, 1979. 764 p.

BRITO, F.L.; ROLIM, M.; PEDROSA, E.M.R. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3 (Suplemento), p. 318-323, 2007.

BRITO, F.L.; ROLIM, M.; PEDROSA, E.M.R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9 (Suplemento), p. 52-56, 2005.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.; GERALDI, R.V. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo.** Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 30 p. (Boletim Técnico, 76).

CAMARGOS, S.L. **Acidez do solo e calagem (reações do solo).** Disponível em: <[www.ufmt.br/famev/gemt/disciplinas/solos](http://www.ufmt.br/famev/gemt/disciplinas/solos)>. Acesso em: 18 jul. 2008.

CAMPOS FILHO, M.F.; SANTOS, M. Setor sucroalcooleiro em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 28, p. 7-11, 2007.

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CARDOSO, M.G. **Produção de aguardente de cana-de-açúcar.** Lavras: UFLA, 2001. 264 p.

COELHO, R.M. **Influência da vinhaça, da fertilização mineral e do cultivo em características químicas da matéria orgânica e da fração mineral de um latossolo vermelho-escuro**. 1990. 84 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Nota sobre tecnologia de controle da fabricação de açúcar e álcool**. São Paulo, 1985. (Relatório Técnico).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Norma técnica P4.231**. São Paulo, 2005.

CORRÊA, S.; SANTOS, C.; REETZ E., R.; RIGON, L.; BELING, R.R. **Anuário brasileiro da cana-de-açúcar**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2007. 128 p.

COSTA, P.O.S. **Avaliação em laboratório, do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Sauípe/Bahia**. 2002. 188 p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

COSTA, S.N.; MARTINEZ, M.A.; MARTINS, J.H.; FERREIRA, P.A. SIMASS - o modelo para simular o transporte de água e solutos no solo I: desenvolvimento e teste de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 183-189, 1999.

DAL BOSCO, T.; IOST, C.; SILVA, L.N.; CARNELLOSI, C.F.; EBERT, D.C.; SCHREINER, J.S.; SAMPAIO, S.C. Utilização de água residuária de suinocultura em propriedade agrícola: estudo de caso. **Irriga**, v. 13, n. 1, p. 139-144, 2008.

DE PAULA, M.B.; HOLANDA, F.S.R.; MESQUITA, H.A.; CARVALHO, V.D. Uso de vinhaça no abacaxizeiro em solo de baixo potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 7, p. 1217-1222, 1999.

DURANT, W. **História da civilização**. São Paulo: Companhia Distribuidora de Livros, 1957. 327 p.

DYMINSKI, A.S. **Contaminação de solos e águas subterrâneas**. Disponível em: <[www.cesec.ufpr.br](http://www.cesec.ufpr.br)>. Acesso em: 15 jul. 2008.

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

FERREIRA, P.A. **Manejo de água-planta em solos salinos**. Viçosa: UFV, 2006. 127 p. (Apostila acadêmica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola).

FERREIRA, P.A.; GARCIA, G.O.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; JUNIOR, J.C.F.B. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café colíon. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 29-35, 2006.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. **Iniciação ao desenvolvimento sustentável**. Belo Horizonte, 2003. 464 p.

GARCIA, G.O. **Alterações químicas, físicas e mobilidade de íons no solo decorrentes da aplicação de água residuária da lavagem e despulpa de frutos do cafeeiro colíon**. 2003. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GLÓRIA, N.A. Utilização racional dos resíduos da agroindústria sucroalcooleira e seus efeitos na produtividade da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO SOBRE TECNOLOGIAS DE MANEJO DE SOLO E ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1, 1994, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SOPRAL/SUCRESP/ALCOOPLAN/ASSISTE, 1994. p. 121-146.

GONÇALVES, A.D.M.A. **Efeitos da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo**. Piracicaba: ESALQ, 2007. 83 p.

GRANATO, E.F. **Geração de energia através da digestão anaeróbia da vinhaça**. 2003. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de São Paulo, Bauru, SP.

KEMPERS, A.J.; ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate methods. **Community in Soil Science Plant Analysis**, New York, v. 17, n. 7, p. 715-723, 1986.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica “Ceres”, 1985. 492 p.

LO MÔNACO, P.A. **Fertirrigação do cafeeiro com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos**. 2005. 96 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

LONGO, R.M.; ESPÍNDOLA, C.R.; BONI, N.R. Efeitos da vinhaça natural e biodigerida no comportamento químico de solos com cana-de-açúcar. **Revista Ecosistema**, v. 24, p. 67-70, 1999.

LUDOVICE, M.T.F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas, SP.



LYRA, R.C.C.; ROLIM, M.M.; SILVA, J.A.A. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003.

MATOS, A.T. **Avaliação dos fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa-MG**. 1994. 110 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MATOS, A.T. Tratamento de resíduos agroindustriais: curso de tratamento de resíduos agroindustriais. In: ENCONTRO DE PRESERVAÇÃO DE MANANCIAS DA ZONA DA MATA MINEIRA, 2, 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2002. p. 104-157.

MATOS, A.T. **Disposição de águas residuárias no solo**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/UFV, 2004. 144 p. (Série Caderno Didático).

MATOS, A.T. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/UFV, 2006. 120 p. (Série Caderno Didático).

MAZZA, J.A. **Variações em algumas propriedades de solos com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) tratados com doses maciças de vinhaça**. Piracicaba: ESALQ, 1985. 104 p.

MELO, R.F. **Avaliação das alterações físicas e químicas, distribuição e mobilidade dos íons em três solos tratados com manipueira**. 2004. 59 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MELO, A.S.S.A.; SILVA, M.P. **Estimando o valor da “externalidade positiva” do uso da vinhaça na produção de cana-de-açúcar: um estudo de caso**. Disponível em: <[www.ecoeco.org.br](http://www.ecoeco.org.br)>. Acesso em: 14 nov. 2007.

MELO, R.F.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; OLIVEIRA, L.B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 456-465, 2006.

MIRRA, E.M.P.; SAKATSUME, F. **A política brasileira de biocombustíveis**. Disponível em: <[www.fbds.org.br](http://www.fbds.org.br)>. Acesso em: 15 mar. 2008.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement: II – theoretical considerations. **Soil Science Society Proceedings**, v. 26, p. 216-221, 1962.

OLIVEIRA, C.R. **Cachaça de alambique**: manual de boas práticas ambientais e de produção. Belo Horizonte: SEMAD/FEAM, 2005. 72 p.

OLIVEIRA, E.M.M.; RUIZ, H.Z.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ, V.H.; BORGES JÚNIOR, J.C.F. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 196-203, 2004.

PASCOAL FILHO, W. Produção de cachaça de alambique. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 28, p. 82-94, 2007.

PASSARIN, A.L.; RODRIGUEIRO, E.L.; ROBAINA, C.R.P.; MEDINA, C.C. Caracterização de agregados de um latossolo vermelho distroférrico típico submetido a diferentes doses de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1255-1260, 2007.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; ROBAINA, C.R.P.; LAURANI, R.A. Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 23, n. 2, p. 145-150, 2002.

PEDROSA, M.R.; ROLIM, M.M.; ALBUQUERQUE, P.H.S.; CUNHA, A.C. Supressividade de nematóide em cana-de-açúcar por adição de vinhaça ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9 (Suplemento), p. 197-201, 2005.

PEREIRA, J.P.; ALVARENGA, E.M.; TOSTES, J.R.P.; FONTES, L.E.F. Efeito da adição de diferentes dosagens de vinhaça a um latossolo vermelho-amarelo distrófico na germinação e vigor de sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 14, n. 2, p. 147-150, 1992.

PIACENTE, F.J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental**: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. 2005. 181 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas, SP.

RESENDE, A.S.; BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 1, p. 17-23, 1987.

RESENDE, A.S.; SANTOS, A.R.P.X.; COELHO, C.H.; GONDIM, A.O.C.O.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 937-941, 2006.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Eds.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5.<sup>a</sup> aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.

ROCHA, J.C.; HENRIQUE, A.; CARDOSO, A.A. **Introdução à química ambiental**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 154 p.

RUIZ, H.A. **Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30, 2005, Recife. **CD-ROM...** Brasília: SBCS, 2005.

RUIZ, H.A.; GHEYIL, H.R.; ALMEIDA, M.T.; RIBEIRO, A.C. Torta de filtro e vinhaça na recuperação de um solo salino-sódico e no desenvolvimento de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 4, p. 659-665, 1997.

SENGIK, E. **Efeitos da vinhaça sobre o solo e conseqüências sobre o crescimento do sorgo granífero**. 1983. 52 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE – SAS. **User's guide, version 6.11**. 4.ed. Cary, 1996. v. 2, 842 p.

SZMRECSÁNYI, T. Tecnologia e degradação ambiental: o caso da agroindústria canavieira no estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v. 24, n. 10, p. 73-78, 1994.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. **Termo de referência para workshop tecnológico**. Disponível em: <[www.apta.sp.gov.br-cana](http://www.apta.sp.gov.br-cana)>. Acesso em: 29 abr. 2008.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

VIANA, A.B. **Tratamento anaeróbio da vinhaça em reator UASB operado em temperatura na faixa termofílica (55°C) e submetido ao aumento progressivo de carga orgânica**. 2006. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, EESC, São Carlos, SP.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 452 p.

## **APÊNDICE**

## APÊNDICE

Quadro 1A – Resumo da ANOVA

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio					
		K	Ca+Mg	Na	pH <sub>1</sub>	pH <sub>2</sub>	CE
Solo	2	165007,438***	142,456***	3,862***	5,719***	8,829***	55668,014***
Dose	4	259351,147***	2,277***	1,266***	0,140***	0,071***	569876,909***
Solo x dose	8	6717,595***	0,226***	1,368***	0,032**	0,068***	4991,741***
Erro	30	162,415	0,021	0,088	0,010	0,004	806,669
CV(%)		5,107	3,671	8,722	1,797	1,455	8,406

\*\*\*, \*\*, \* F significativos a 0,1%; 1% e 5%, respectivamente. K – potássio trocável; Ca+Mg – cálcio mais magnésio; Na – sódio trocável pH<sub>1</sub> – potencial hidrogeniônico em água; pH<sub>2</sub> – potencial hidrogeniônico em KCl; CE – condutividade elétrica; CV = coeficiente de variação.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio					
		Al <sup>3+</sup>	H+Al	t	T	ADA	CC
Solo	2	7,633***	142,435***	109,886***	90,214***	314,155***	2441.298***
Dose	4	0,026***	1,423***	7,021***	3,022***	3,144**	7.324***
Solo x dose	8	0,017**	0,429***	0,447***	0,231***	3,961***	1.484*
Erro	30	0,003	0,022	0,026	0,046	0,488	0.566
CV(%)		9,639	3,025	3,191	2,273	8,236	2,422

\*\*\*, \*\*, \* F significativos a 0,1%; 1% e 5%, respectivamente. Al<sup>3+</sup> – acidez trocável; H+Al – acidez potencial; t – capacidade de troca catiônica efetiva; ; T – capacidade de troca catiônica a pH 7; ADA – argila dispersa em água; CC – capacidade de campo; CV = coeficiente de variação.