

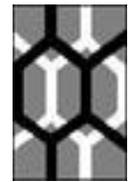


UFAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Instituto de Química e Biotecnologia

Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia



IQB

CICERO ALEXANDRE SILVA

**ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS EM ARGISSOLOS TRATADOS COM
VINHAÇA POR 25 ANOS NO ESTADO DE ALAGOAS**

Maceió – AL

2013

CICERO ALEXANDRE SILVA

**ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS EM ARGISSOLOS TRATADOS COM
VINHAÇA POR 25 ANOS NO ESTADO DE ALAGOAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientadora Marília Oliveira Fonseca Goulart

Coorientadora Iara Barros Valentim

Maceió – AL

2013

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos

S586a Silva, Cicero Alexandre.
Atributos físico-químicos em argilossolos tratados com vinhaça por 25 anos no estado de Alagoas / Cicero Alexandre Silva. – 2013.
153 f. : il.

Orientadora: Marília Oliveira Fonseca Goulart.
Coorientadora: Iara Barros Valentim.
Tese (Doutorado em Química e Biotecnologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Química e Biotecnologia. Maceió, 2013.

Bibliografia: f. 134-148.
Glossário: f. 149-151.
Apêndice: f. 152-153..

1. Vinhaça. 2. Solo – Química. 3. Solo – Matéria orgânica.
4. Carbono solúvel em água. 5. Resíduo da destilação de vinho. 6. Cana-de-açúcar – Mosto. I. Título.

CDU: 543.63:631.45



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE QUÍMICA E BIOTECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA E
BIOTECNOLOGIA



BR 104 Km14, Campus A. C. Simões
Cidade Universitária, Tabuleiro dos Martins
57072-970, Maceió-AL, Brasil
Fone: (82) 3214-1144
Email: ppgqb.ufal@gmail.com

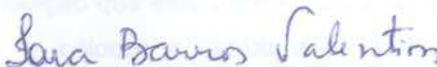
FOLHA DE APROVAÇÃO

Membros da Comissão Julgadora da Defesa de Tese do doutorando **Cícero Alexandre Silva**, intitulada: **“Atributos Físico-Químicos em Argissolos Tratados com Vinhaça por 25 anos no Estado de Alagoas”**, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia da Universidade Federal de Alagoas em 12 de julho de 2013, às 8:30 h, na Sala de Reuniões do IQB/ UFAL.

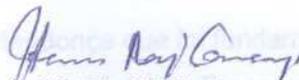
COMISSÃO JULGADORA



Prof.ª Dr.ª Marília Oliveira Fonseca Goulart
Orientadora - PPGQB/IQB/UFAL



Prof.ª Dr.ª Iara Barros Valentim
Coorientadora - IFAL



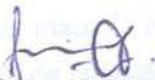
Prof. Dr. Hans Raj Gheyi
UFRB



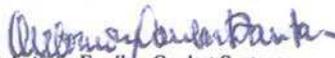
Prof. Dr. Mauro Wagner Oliveira
CECA/UFAL



Prof. Dr. João Gomes da Costa
PPGQB/EMBRAPA



Prof. Dr. Josealdo Tonholo
PPGQB/IQB/UFAL



Prof. Dr. Antonio Euzébio Goulart Santana
PPGQB/IQB/UFAL

AGRADECIMENTOS

À minha família por me ter dado apoio e incentivo para que eu conduzisse os trabalhos; fazendo muitas viagens ao campo, finais de semanas no laboratório e adentrando muitas noites no escritório: pesquisando e escrevendo.

À minha orientadora Prof^a Dr^a Marília Oliveira Ferreira Goulart e co-orientadora Iara Barros Valentim pelas suas tolerâncias às minhas teimosias, serenidade (de sempre estar atrasado) e inquietação (de sempre estar querendo mudar o rumo do que estava feito), como também, pelas contribuições que foram dadas para o trabalho chegar ao seu final com êxito.

Aos funcionários Geime Victor dos Santos e José Carlos Procidônio, da Usina Marituba, que contribuíram para que os trabalhos difíceis de campo fossem transformados em tarefas fáceis, e por passarem todo o tempo necessário acompanhando e ajudando na coleta dos solos para serem analisados. Ao Eng. Agr^o Glênio Fireman Tenório pelo apoio e em especial ao Eng. Agr^o Aryl Pontes Lyra que sempre acreditou na contribuição que este trabalho trará ao setor sucroalcooleiro, e, sobretudo, por comandar e colocar a estrutura da Usina à disposição dessa pesquisa, para que ela fosse conduzida até o fim sem dificuldades.

Ao téc. agrícola José Marcos Mendonça que foi fundamental nas tarefas no campo e aos técnicos: Roberval, Wellington e Vinícius. E especialmente ao Eng. Agr^o Marco Antonio Cabral Maranhão, por acreditar na contribuição desta pesquisa ao setor sucroalcooleiro, liberou o departamento agrícola da Usina Santo Antonio para ficar à nossa disposição durante os trabalhos de campo na usina.

Ao amigo José Romeu Lira que foi quem me alertou para que eu fosse trabalhar na área de solo, justamente quando ele me disse: “ - Professor Cicero, você entende mesmo é de solo, né verdade?; então, vá fazer sua pesquisa com solo, deixe essa ração prá lá, se não você vai se dar mau!...”. Isto porque eu estava trabalhando no enalço de uma ração, com resíduos de cana-de-açúcar, destinada a gado de leite.

Ao Prof. Dr. Paulo Vanderlei Ferreira pela contribuição dada para que eu concluísse o trabalho, e, além disso, juntamente com o acadêmico de agronomia Islan Diego, contribuiu com orientações no tocante ao planejamento e cálculos estatísticos.

Ao amigo Dr. Jorge Luiz Xavier Lins da Cunha que por todo o tempo estava ao meu lado incentivando, orientando, ajudando, e além de tudo, dando força para que eu ultrapassasse algumas dificuldades encontradas no andamento das atividades.

Aos colegas Afonso Marinho, Clemens Fortes e Tânia Gomes, que muitas vezes foram à minha sala para me incentivar, com palavras de ânimo, ao ponto de se prontificarem a ajudar no que fosse possível, pois acreditavam que o trabalho seria valioso para mim e para sociedade.

Aos colegas Amaro Carlos, Amaro Cavalcante e Pierre Escodro, companheiros leais, persistes e incentivadores, sempre presentes nos momentos difíceis que enfrentamos para cumprir as tarefas das disciplinas do curso.

Aos meus colegas dos laboratórios do CECA: Alan Farias, Cicero Alves, Cosmo Alves, Jilvanete Araújo, José Carlos, José Marques (Dida), Moacir Manoel, Sebastião da Silva e aos acadêmicos Felipe Teodósio e Tais Almeida, pelas contribuições dadas nos trabalhos no campo e nos laboratórios (fertilidade e física).

Aos colegas do laboratório de eletroquímica, especialmente à doutoranda Camila Calado de Vasconcelos e aos mestrandos Leonardo Vieira da Silva e Orlando Roberto Pimentel Araújo pelas suas contribuições.

À comissão julgadora do Exame de Defesa de Tese composta pelas (os) Professoras (es) e Doutoradas (es): Antonio Euzébio Goulart Santana, Hans Raj Gheyi, João Gomes da Costa, Josealdo Tonholo e Mauro Wagner de Oliveira, pelos esforços despendidos para atenderem à convocação formulada pelo Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia da Universidade Federal de Alagoas e também pelas contribuições dadas para melhoria do trabalho.

À CAPES, CNPq, FAPEAL e as usinas Marituba e Santo Antonio.

RESUMO

A cana-de-açúcar é a matéria prima que depois de industrializada origina vários derivados, tendo como principais o açúcar e o álcool. Após o processo de fermentação do caldo e posterior destilação, originam-se o álcool e a vinhaça. Essa, que antes era considerada poluente, atualmente é utilizada, com zelo, para a melhoria das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo. O presente trabalho visou avaliar, em laboratório, as modificações e deslocamentos de alguns atributos físicos e químicos em dois Argissolos que recebem vinhaça há mais de 25 anos, nas usinas Marituba (UMA) e S^{to} Antonio (USA), localizadas na região canavieira de Alagoas, Brasil. Foram utilizadas amostras de solos coletadas em cinco camadas (0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm) do perfil do solo, em que se aplicou o fatorial $2^2 \times 5$ [(2)usinas-(2) com vinhaça (CV) e sem vinhaça (SV)-(5)camadas], totalizando vinte tratamentos com quatro repetições. Pelos resultados, se observou que a vinhaça promoveu alterações significativas no solo. Os atributos: pH, P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, Matéria Orgânica do Solo (MOS), Carbono Solúvel em Água (CSA), percentagem de potássio trocável na capacidade de troca de cátions em (%K_{CTC}) e porosidade apresentaram diferenças significativas a 0,01 de probabilidade pelo teste F. As variáveis, densidade do solo (DS) e argila, apresentaram diferenças significativas a 0,05 de probabilidade e capacidade de troca de cátions (CTC) e areias foram não significativas (NS). Para as variáveis do solo houve significância a 0,01 para: pH, P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, MOS, CSA, CTC, areias e porosidade, enquanto as variáveis % K_{CTC} e DS foram NS. Na interação de vinhaça com camadas, houve diferenças significativas pelo teste F a 0,01 para P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, MOS, CTC, DS, % K_{CTC} e areias. Houve diferença significativa a 0,05 para pH, CSA e argila. Na interação de vinhaça com camadas, as diferenças a 0,01 foram para P, Ca²⁺+Mg²⁺, MOS, CSA, e % K_{CTC}, com 0,05 de probabilidade, as variáveis CTC e DS apresentaram diferenças significativas, já pH, K⁺, CTC, areia, argila e porosidade foram NS. Comparando as médias entre as áreas com e sem vinhaça, pelo teste de Tukey a 0,05, tem-se médias maiores para camadas da área que receberam vinhaça, para pH, P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, CSA, DS e % K_{CTC}. Foram semelhantes para CTC e areias, porém, na área que não recebeu vinhaça apresentaram superioridade: MOS, argila e porosidade. Os dados obtidos no presente trabalho indicam que a adição de vinhaça ao solo foi benéfica e por isso se recomenda a manutenção de seu uso, diante da comparação entre o benefício e o prejuízo que a vinhaça poderá causar.

Palavras-chave: Resíduo da destilação do vinho. Matéria orgânica. Carbono solúvel em água. Capacidade de troca de cátions. Vinhoto. Solo.

ABSTRACT

The sugarcane is a raw material which after industrialization originates derivatives, like sugar and alcohol, extremely important for the country economical income. The process of fermentation of the broth and posterior distillation originate alcohol and vinasse. The last was earlier considered as a pollutant, however, nowadays it is carefully used for the improvement of biological, physical and chemical properties of the soil. The present work aims to evaluating, in laboratory, the modifications and displacements of some physical and chemical attributes in two clayish soils that had received vinasse for more than 25 years, in the factories Marituba (UMA) and S^{to} Antonio (USA), in the sugar cane region of Alagoas state, Brazil. The soil samples were collected in five layers (0-10, 10-20, 20-40, 40-70 and 70-100 cm) of depth, using the factorial [(2) plant (2) +vinasse (+v)/ -vinasse (-v) - (5) layers], 2²x5 totalizing twenty treatments with four repetitions. From the results, it was noticed that vinasse promoted significant alterations in the soil, in accordance with the variance analysis (ANAVA), for with 0,01 of probability for test F, the attributes: pH, P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, Total Organic Matter in Soil (OMS), Water Soluble Carbon (WSC), Potassium Saturation in the Cation Exchange Capacity (CEC) and porosity, The variables Soil Density (SD) and clay had presented significant differences, 0,05 level of probability and sands had been non-significant (NS). For the changeable layers in the profile of the ground, the parameters that had significance in 1% were; pH, P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, OMS, WSC, CEC, sands and porosity, while the variable CEC and SD had been non-significant (NS). In the interaction of vinasse with layers the parameters that had significant differences for F test 0,01 were P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, MOS, CTC, DS, % K⁺_{CTC} and sands, with significant difference of 0,05 for pH, CSA and clay. In the interaction of vinasse with layers, the differences 0,01 had been for P, Ca²⁺+Mg²⁺, OMS, WCS, and % K⁺_{CTC}, of 0,05 of probability, the variables CTC and DS presented significant differences, already pH, K⁺, CEC, sands, clay and porosity had been NS. Comparing the averages among areas with and without vinasse, for the test of Tukey 0,05, have average higher for layers of the area that received vinasse: pH, P, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, WCS, SD and % K⁺_{CTC}. They had been similar for CEC and sands, however, in the area that did not receive vinasse, OMS, clay and porosity had presented higher values. The data obtained in this study indicate that the addition of vinasse was beneficial to the soil and therefore it is recommended to maintain its use, on the comparison between the benefit and the damage it can cause stillage.

Key-words: Residue from the manufacture of wine. Organic Matter. Water Soluble Carbon. Cation Exchange capacity. Vinhoto. soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Região canavieira do Estado de Alagoas com os locais onde foram conduzidos os trabalhos: na região sul está localizada a usina Marituba e na norte a usina Santo Antonio.	50
Figura 2 - Máquina que foi utilizada para fazer as trincheiras nas áreas.	52
Figura 3 - Marcação das camadas no perfil do solo.	53
Figura 4 - Transporte da vinhaça por canal para irrigar por aspersão.	54
Figura 5 - Transporte da vinhaça por caminhão-tanque.	54
Figura 6 - Amostras de solos estruturadas coletadas na trincheira com o cilindro de Uhland.	56
Figura 7 - Teores da densidade do solo (kg dm^{-3}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	65
Figura 8 - Teores da densidade do solo (kg dm^{-3}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	67
Figura 9 - Teores de areia (dag kg^{-1}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	70
Figura 10 - Teores de areia (dag kg^{-1}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	71
Figura 11 - Teores de argila (dag kg^{-1}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	75
Figura 12 - Teores de argila (dag kg^{-1}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	76
Figura 13 - Teores da porosidade total (%) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	79
Figura 14 - Teores da porosidade total (%) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	80
Figura 15 - Teores de pH dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	86
Figura 16 - Teores de pH dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	87
Figura 17 - Teores de Fósforo (mg dm^{-3}) dos solos coletados na UMA, na pro-	

fundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	90
Figura 18 - Teores de Fósforo (mg dm^{-3}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	92
Figura 19 - Teores de Potássio (mg dm^{-3}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	97
Figura 20 - Teores de Potássio (mg dm^{-3}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	100
Figura 21 - Teores de cálcio + magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	105
Figura 22 - Teores de cálcio + magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça .	106
Figura 23 - Teores de matéria orgânica (dag kg^{-1}) dos solos coletados na UMA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	111
Figura 24 - Teores de matéria orgânica (dag kg^{-1}) dos solos coletados na USA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	114
Figura 25 - Teores de carbono solúvel em água (mg dm^{-3}) dos solos coletados na UMA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	118
Figura 26 - Teores de carbono solúvel em água (mg dm^{-3}) dos solos coletados na USA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	119
Figura 27 - Teores da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	123
Figura 28 - Teores da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos coletados na USA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	124
Figura 29 - Teores da saturação de Potássio ($\% K_{\text{CTC}}$) dos solos coletados na UMA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça ...	128
Figura 30 - Teores da saturação de Potássio ($\% K_{\text{CTC}}$) dos solos coletados na USA na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados médios das análises de vinhaça nos três tipos de mostos em destilarias de Alagoas.	25
Tabela 2 - Distribuição das variáveis utilizadas no esquema da variação estatística, sendo: ambiente (usinas), condições e camadas.	60
Tabela 3 – Tratamentos adotados nas duas usinas.	61
Tabela 4 – Esquema da análise de variância.	62
Tabela 5 - Análise de variância dos atributos físicos de solos coletadas em cinco camadas nas UMA e USA, em áreas com e sem vinhaça.	64
Tabela 6 - Resultados da densidade do solo (kg dm^{-3}) das amostras obtidas nas UMA e USA, até a profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	65
Tabela 7 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) da densidade do solo (kg dm^{-3}) nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	68
Tabela 8 - Resultados de areia (dag kg^{-1}) das amostras coletadas nas UMA e USA, até a profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	69
Tabela 9 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) de areia (dag kg^{-1}) nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	72
Tabela 10 - Resultados de argila (dag kg^{-1}) dos solos das UMA e USA, coletados até 1 m de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	74
Tabela 11 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) de argila (dag kg^{-1}) nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	77
Tabela 12 - Resultados da porosidade total do solo (%) na UMA e USA, proveniente de amostras coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	78
Tabela 13 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) da porosidade total do solo (%) nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	81
Tabela 14 - Análise de variância dos atributos químicos dos solos coletadas	

em cinco camadas nas UMA e USA, em áreas com e sem vinhaça.	84
Tabela 15 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) do pH nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	85
Tabela 16 - Teores de pH dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.	88
Tabela 17 - Resultados de fósforo (mg dm^{-3}) dos solos nas usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	89
Tabela 18 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) de fósforo (mg dm^{-3}) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	93
Tabela 19 - Resultados de potássio (mg.dm^{-3}) dos solos nas usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	96
Tabela 20 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) do potássio (mg dm^{-3}) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	102
Tabela 21 - Resultados de cálcio + magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos nas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	104
Tabela 22 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) de cálcio + magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	108
Tabela 23 - Resultados da matéria orgânica do solo (dag kg^{-1}) nas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	110
Tabela 24 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) da matéria orgânica do solo (dag kg^{-1}) nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	116
Tabela 25 - Resultados de carbono solúvel em água (mg dm^{-3}) dos solos das UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	117

Tabela 26 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) do carbono solúvel em água (mg dm^{-3}) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	121
Tabela 27 - Resultados da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos das UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	122
Tabela 28 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.....	125
Tabela 29 - Resultados da saturação de saturação de Potássio ($\% K_{CTC}$) nos solos das UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.	127
Tabela 30 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) da saturação de saturação de Potássio ($\% K_{CTC}$) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.	132

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\%K_{CTC}$	Porcentagem de potássio trocável na CTC
ϵ_0	Capacitância no vácuo
ANAVA	Análise de variância
C/N	Relação carbono / nitrogênio
Ca^{2+}_v	Cálcio presente na vinhaça
CECA	Centro de Ciências Agrárias
COTS	Carbono orgânico total do solo
CSA	Carbono solúvel em água
CTC	Capacidade de troca de cátions
CV	Com vinhaça
CV (%)	Coefficiente de variação (%)
D	Distância dielétrica
$dag\ kg^{-1}$	Decagrama por kilograma (igual a %)
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DCD	Dupla camada difusa
DP	Densidade da partícula
DS	Densidade do solo
Dyn	Dina
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
$FCR_{média}$	Força centrífuga relativa
H	Constante de Boltzmann
Há	Hectare
K^+	Potássio trocável
K^+_v	Potássio presente na vinhaça
K_G	Coefficiente de seletividade
K_{sol}	Potássio solúvel
K_v	Potássio da vinhaça
LAPA	Laboratório de Análises de Produtos Agropecuários
Mg^{2+}_v	Magnésio presente na vinhaça

MOS	Matéria orgânica do solo
N _o	Concentração do íon
NS	Não significativo
PCZ	Potencial de carga zero
P _o	Fósforo orgânico
PTS	Porosidade total do solo
SNLCS	Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do solo
SV	Sem vinhaça
T	Tratamento
TFSA	Terra fina seca ao ar
TFSE	Terra fina seca à estufa
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UMA	Usina Marituba
USA	Usina Santo Antonio
Y ⁺	Cátion monovalente
Y ⁺⁺	Cátion divalente

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	19
2 - METAS	22
3 – REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 – Características da vinhaça	23
3.2 – Vinhaça no solo	25
3.3 – Atributos físicos do solo	27
3.3.1 – Densidade do solo	27
3.3.2 – Areia	29
3.3.3 – Argila	30
3.3.4 – Porosidade total do solo	32
3.4 – Atributos químicos do solo	33
3.4.1 – pH	34
3.4.2 – Fósforo	36
3.4.3 – Potássio	38
3.4.4 – Cálcio + Magnésio	40
3.4.5 – Matéria orgânica do solo	41
3.4.6 – Carbono solúvel em água	45
3.4.7 – Saturação de Potássio na CTC	47
3.4.8 – Capacidade de Troca de Cátions	47
4 – MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1 – Localização da área experimental	50
4.2 – Coleta do solo	51
4.2.1 – Abertura das trincheiras	51
4.2.2 – Aplicação da vinhaça	53
4.2.3 – Preparo do solo no laboratório	55
4.2.4 – Determinações no solo para obtenção dos atributos físicos	55
4.2.4.1 – Densidade do solo	55
4.2.4.2 – Areia	56
4.2.4.3 – Argila	56
4.2.4.4 – Porosidade total do solo	56
4.2.5 – Determinações no solo para obtenção dos atributos químicos	57
4.2.5.1 – pH	57

4.2.5.2 – Fósforo, potássio e sódio	57
4.2.5.3 – Cálcio + Magnésio	58
4.2.5.4 – Hidrogênio + Alumínio	58
4.2.5.5 – Carbono total	58
4.2.5.6 – Carbono solúvel em água	59
4.2.5.7 – Capacidade de troca de cátions	59
4.2.5.8 – Saturação de Potássio na CTC	60
4.3 – Planejamento da análise estatística	60
4.3.1 – Distribuição das variáveis	60
4.3.2 – Distribuição dos tratamentos	61
4.3.3 – Análise de variância	61
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1 – Atributos físicos do solo nas UMA e USA	63
5.1.1 – Mudanças causadas pela vinhaça na densidade do solo na UMA	64
5.1.2 – Mudanças causadas pela vinhaça na densidade do solo na USA	66
5.1.3 – Interações entre as variáveis ligadas à areia do solo nas UMA e USA ...	67
5.1.4 – Mudanças causadas pela vinhaça em areia do solo na UMA	69
5.1.5 – Mudanças causadas pela vinhaça em areia do solo na USA	71
5.1.6 – Interações entre as variáveis ligadas à areia do solo nas UMA e USA ...	72
5.1.7 – Mudanças causadas pela vinhaça em argila do solo na UMA	74
5.1.8 – Mudanças causadas pela vinhaça em argila do solo na USA	75
5.1.9 – Interações entre as variáveis ligadas à argila do solo nas UMA e USA ..	76
5.1.10 – Mudanças causadas pela vinhaça na porosidade total do solo na UMA	78
5.1.11 – Mudanças causadas pela vinhaça na porosidade total do solo na USA	79
5.1.12 – Interações entre as variáveis ligadas à porosidade total do solo nas UMA e USA	80
5.2 – Atributos químicos do solo nas UMA e USA	82
5.2.1 – Mudanças causadas pela vinhaça no pH do solo na UMA	84
5.2.2 – Mudanças causadas pela vinhaça no pH do solo na USA	87
5.2.3 – Interações entre as variáveis ligadas ao pH do solo nas UMA e USA	88
5.2.4 – Mudanças causadas pela vinhaça no Fósforo do solo na UMA	89
5.2.5 – Mudanças causadas pela vinhaça no Fósforo do solo na USA	91
5.2.6 – Interações entre as variáveis ligadas ao Fósforo do solo nas UMA e	

USA.....	92
5.2.7 – Mudanças causadas pela vinhaça no Potássio do solo na UMA	94
5.2.8 – Mudanças causadas pela vinhaça no Potássio do solo na USA	99
5.2.9 – Interações entre as variáveis ligadas ao Potássio do solo nas UMA e USA	101
5.2.10 – Mudanças causadas pela vinhaça no Cálcio + Magnésio do solo na UMA	103
5.2.11 – Mudanças causadas pela vinhaça no Cálcio + Magnésio do solo na USA	106
5.2.12 – Interações entre as variáveis ligadas ao Cálcio + Magnésio do solo nas UMA e USA	107
5.2.13 – Mudanças causadas pela vinhaça na matéria orgânica do solo na UMA	109
5.2.14 – Mudanças causadas pela vinhaça na matéria orgânica do solo na USA	113
5.2.15 – Interações entre as variáveis ligadas à matéria orgânica do solo nas UMA e USA	115
5.2.16 – Mudanças causadas pela vinhaça no Carbono solúvel em água do solo na UMA	117
5.2.17 – Mudanças causadas pela vinhaça no Carbono solúvel em água do solo na USA	119
5.2.18 – Interações causadas pela vinhaça no Carbono solúvel em água do solo nas UMA e USA	120
5.2.19 – Mudanças causadas pela vinhaça na capacidade de troca de cátions do solo na UMA	121
5.2.20 – Mudanças causadas pela vinhaça na capacidade de troca de cátions do solo na USA	124
5.2.21 – Interações entre as variáveis ligadas à capacidade de troca de cátions do solo nas UMA e USA	125
5.2.22 – Mudanças causadas pela vinhaça na saturação de Potássio no solo na UMA	126
5.2.23 – Mudanças causadas pela vinhaça na saturação de Potássio no solo na USA	128

5.2.24 – Interações causadas pela vinhaça na saturação de Potássio no solo nas UMA e USA	131
6 – CONCLUSÕES	133
6.1 – Atributos físico-químicos do solo na área com vinhaça na UMA	133
6.2 – Atributos físico-químicos do solo na área com vinhaça na USA	133
REFERÊNCIAS	134
GLOSSÁRIO	149
APÊNDICE	152

1 - INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura que gera, nos processos de fabricação do açúcar e do álcool, diversos produtos e resíduos que são utilizados tanto na alimentação humana, animal e na agricultura, além de ter elevado rendimento em matéria verde e ser produtora de mais calorias metabolizáveis que qualquer outra cultura (JUNQUEIRA, 2009).

É, também, uma cultura de cunho estratégica para geração de energia automotiva, produzindo o álcool hidratado (combustível renovável e não poluente), uma das alternativas de uso de energia limpa que é sucesso no Brasil, por ser um biocombustível produzido a partir da cana-de-açúcar (JUNQUEIRA, 2009), que pode ser usado em substituição à gasolina (combustível de origem fóssil); além de participar como componente importante na matriz energética da nação brasileira, na co-geração de energia elétrica, mostrando sua elevada contribuição para o equilíbrio ambiental, que passa pela alta taxa de sequestro de carbono e redução dos efeitos da emissão de poluentes para a atmosfera. Portanto, várias instituições de ensino e pesquisas trabalham na busca de outras fontes de energia renovável, para se somar a já dominada produção do álcool.

Como o aumento no consumo de álcool combustível reflete diretamente na elevação proporcional da quantidade de matéria prima a ser processada para atender a esta demanda, origina-se, conseqüentemente, uma grande quantidade de um tipo de resíduo, bastante poluente aos meios aquáticos, porém de grande importância para utilização nas áreas agrícolas, conhecida pelo nome de vinhaça, qual, no processo de destilação do mosto, cada litro de álcool produzido na destilaria ocasiona uma média de 12 a 15 litros de vinhaça (PAULINO et al., 2010; SANTOS et al., 2013).

O crescimento do consumo de álcool hidratado pelo reflexo do aumento da frota de veículos no país, movida por este combustível (renovável e procedente da cana-de-açúcar), tem proporcionado alguns transtornos às destilarias, unidades processadoras desta matéria prima, pela grande produção do resíduo, e que traz preocupação quanto ao ponto de vista ecológico, devido à sua composição química

e conseqüente elevada DBO, que pode causar profundas transformações se por deslize chegar aos ambientes de veiculação hídrica como cursos d'água, rios, lagoas, áreas de proteção ambiental, etc., já que os locais apropriados para acondicionar com segurança a vinhaça produzida nas destilarias são as lagoas de decantação (tanque pulmão), antes de ser levada para aplicação no campo, onde é distribuída em área total com a finalidade de fertirrigação (fertilização e irrigação, simultaneamente) das áreas agrícolas (ICIDCA, 1999; BARROS et al., 2011).

O Brasil tem, aproximadamente, uma área de 8,40 milhões de hectares ocupada com a cultura da cana-de-açúcar, a qual produziu na safra 2011, algo em torno de 571 milhões de toneladas de colmos (OLIVEIRA et al., 2013), sendo que 51,70 % desta produção foi destinada para fabricação de açúcar (CONAB, 2012), enquanto o restante serviu para produção de 14 bilhões de litros de álcool (anidro e hidratado), correspondendo a uma produção de um volume aproximadamente 200 bilhões de litros de vinhaça, que seria suficiente para fertilizar apenas 23,81% de toda área plantada com cana-de-açúcar no país, utilizando a dose média mais recomendada que de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (UNICA, 2012; SILVA, 2012).

O Estado de Alagoas é o maior produtor de cana-de-açúcar do Nordeste, com diferentes tipos de solos e regimes pluviométricos onde esta cultura se desenvolve muito bem, conforme registro de Orlando Filho et al. (1983), quando afirmam que os solos são basicamente compostos por 55 % de Podzólico Vermelho Amarelo (Argissolos), 35 % de Latossolo Vermelho Amarelo, 4 % de hidromórfico, com 6 % para os demais tipos de solos. Com raras exceções, são solos que apresentam reduzidos níveis de fertilidade e matéria orgânica, além de elevados níveis de acidez, areias e toxicidade pela presença de alumínio (EMBRAPA, 2010), necessitando, portanto, um manejo especial com a utilização de calagem e de adubações mineral e orgânica, prestando-se, portanto, para receber grandes volumes de vinhaça nas áreas onde há a presença da cana-de-açúcar.

A vinhaça é um resíduo que dispõe de características poluentes, no entanto, ao mesmo tempo, possui nutrientes minerais solúveis que trazem melhorias para fertilidade do solo e são prontamente aceitos pelas plantas para sua nutrição (UNICA, 2007). A sua utilização como complemento na adubação mineral do solo

com cana-de-açúcar começou na década de 70, com trabalhos que a complementava apenas com o nitrogênio e o fósforo na forma de adubo químico, com ausência total de potássio, por ser um nutriente presente em sua composição em expressiva concentração, podendo chegar até 7 kg de K_2O para cada 1.000 litros de vinhaça, quando é originária de mosto de melaço (ZAMBELLO JUNIOR; ORLANDO FILHO, 1981; SILVA, 1983; BONINI, 2012), condição esta que permite programar aplicações anuais de dosagens variáveis de 100 a 400 $m^3 ha^{-1}$.

Diante da comparação entre o benefício e o prejuízo proveniente da utilização da vinhaça, é imprescindível que se tenha o acompanhamento periódico da dosagem a ser aplicada, das análises químicas do solo e da vinhaça, para evitar danos fortemente impactados pelo uso intensivo da mesma, tendo-se a preocupação de acompanhar os efeitos nas propriedades do solo, mediante estudos periódicos das áreas fertirrigadas, pois, há forte interesse acadêmico, investigativo e extensionista na obtenção destes resultados, pois, a presente pesquisa trabalha nesta perspectiva e seus resultados serão devidamente apresentados à comunidade sucroalcooleira local, regional, nacional e internacional, para se utilizar dos resultados obtidos e deles se fazer uso.

2 - METAS

a) Realizar análises físico-químicas de solos (Argissolos) em áreas agrícolas (com ou sem vinhaça), nas usinas Marituba e Santo Antonio, tratadas continuamente com vinhaça, há mais de 25 anos, visando obter informações em relação ao acúmulo de nutrientes no solo e aos benefícios proporcionados à fertilidade do solo;

b) comparar, em cada usina, a área que recebe vinhaça há 25 anos, com a área testemunha (sem vinhaça mas com NPK, de acordo com a análise do solo);

c) coletar, analisar e verificar os impactos nos solos, em cinco diferentes profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm), nas áreas com e sem vinhaça, em cada usina, para realização das análises físico-químicas;

d) avaliar os efeitos da vinhaça nos seguintes atributos físicos do solo: densidade do solo, areia, argila e porosidade, nas áreas com e sem vinhaça em cada usina;

e) avaliar os efeitos da vinhaça nos seguintes atributos químicos do solo: pH, Fósforo, Potássio, Cálcio + Magnésio, Matéria Orgânica do Solo, Carbono Solúvel em Água, Capacidade de Troca de Cátions e Saturação de Potássio, nas áreas com e sem vinhaça em cada usina;

f) avaliar, em cada usina, se há tendência de deslocamento dos atributos físicos e químicos no perfil do solo;

g) determinar modelos matemáticos que simulem a interação dos níveis teóricos de cada atributo, na profundidade desejada, especificamente, para esse tipo de solo.

3 - REVISÃO DE LITERATURA

3.1 - Características da vinhaça

O álcool (anidro ou hidratado) é um produto oriundo da destilação fracionada do caldo fermentado (vinho) da cana-de-açúcar, o qual submetido a esse processo de produção origina um derivado denominado vinhaça: líquido residual que recebe diversos nomes regionais, tais como calda, caxixe, restilo, tiborna e vinhoto (SILVA, 1983; BARROS, 2011; MARIA, 2011).

É um resíduo produzido em muitos países do mundo, não só como subproduto da cana-de-açúcar; mas também pode ser proveniente de outras matérias-primas como beterraba (na Europa), milho, madeira (nos Estados Unidos), etc., apresentando nas suas propriedades físico-químicas, portanto, diferentes composições químicas (SILVA et al., 2007).

A vinhaça, quantitativamente, constitui um dos maiores resíduos da indústria de derivados da cana-de-açúcar e é caracterizada por ser um líquido de cor marrom escuro, de odor penetrante, apresentando uma alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), com baixo valor de pH e níveis altos de potássio e matéria orgânica (SILMARA, 2008; TEDESCO et al., 2008, p. 125).

Segundo Braile; Cavalcanti (1979), *apud* Maria (2011, p. 30), a produção da vinhaça ocorre da seguinte forma: após a cana-de-açúcar chegar à usina é submetida a uma lavagem e em seguida moída para extração do caldo (mistura composta por sacarose, glicose, levulose, matéria nitrogenada, entre outros). Depois de o caldo passar pelos processos de clarificação, concentração e centrifugação, obtêm-se o açúcar comercial e o mel. Este, por sua vez, passa por um novo processo de cozimento a vácuo para obtenção do açúcar de segunda e em seguida se transforma em mel final, também chamado de mel pobre ou melaço, o qual pode ser diluído (em água ou em caldo de cana) para dar origem aos mostos de mel ou misto, respectivamente, que será enviado à dorna para ser submetido ao processo de fermentação. Vale salientar que existe, também, o mosto de caldo, que passará pelo mesmo procedimento dos mostos já mencionados (mel e misto).

Depois do mosto (mel, misto ou caldo) ter sido selecionado e enviado para a dorna, no decorrer de 6 a 8 horas, o mosto que foi selecionado se transformará em vinho, o qual será centrifugado com o objetivo de recuperar o fermento, para em seguida ser encaminhado à coluna de destilação, que submetida ao vapor úmido invertido, resulta na produção do álcool hidratado e da vinhaça propriamente dita, que é o resíduo da destilação do vinho, saindo do processo com uma temperatura aproximada de 107°C, com certo odor característico, qualidade esta que está relacionada ao teor residual de açúcar, que, por sua vez, provoca um processo de decomposição, tão logo seja descartada, liberando gases para atmosfera, com cheiro forte e abundante (FREIRE; CORTEZ, 2000; OLIVEIRA et al., 2013).

Em Alagoas, o cultivo da cana-de-açúcar se estende de norte a sul do Estado, abrangendo toda região da mata costeira, avançando na direção oeste até uma distância em torno de 100 km, onde se pode constatar a maior produtividade, a maior área plantada e o maior nível tecnológico do nordeste, chegando a produzir anualmente na faixa que vai de 20 a 25 milhões de toneladas de colmos por safra (<http://www.sindacucar-al.com.br>, 2012).

Da cana-de-açúcar anualmente colhida no Brasil, em torno de 70 % é destinada à produção de açúcar, enquanto o restante, em torno de 30% se destinará à fabricação de álcool (anidro e hidratado), o que gerará um volume aproximado de 900 milhões de litros de vinhaça; que, segundo Freire; Cortez (2000) se caracteriza como um efluente com alto poder fértil e poluente, sendo este cerca de cem vezes mais poluente do que o esgoto sanitário doméstico.

O aproveitamento racional da vinhaça vem sendo estudado, há bastante tempo, como fertirrigação nas áreas agrícolas cultivadas com cana-de-açúcar. Sabe-se que, dependendo do mosto que a origina, poderá apresentar uma DBO que varia de 20.000 a 35.000 mg kg⁻¹ (SILMARA, 2008; JUNQUEIRA et al., 2009), sendo influenciada pela presença da matéria orgânica coloidal e de vários nutrientes indispensáveis à nutrição da planta, como N, P e K, expressos em kg m⁻³, provenientes dos mostos de: melaço, misto e de caldo (VASCONCELOS, 1983), conforme mostra a **Tabela 1**.

Tabela 1 - Resultados médios das análises de vinhaça nos três tipos de mostos em destilarias de Alagoas.

Elementos	Mosto de caldo	Mosto misto	Mosto de melaço
	kg m ⁻³		
N	0,42	0,43	0,44
P ₂ O ₅	0,23	0,21	0,14
K ₂ O	2,45	3,93	5,33
CaO	0,74	0,77	1,13
MgO	0,69	0,60	0,56
Carbono	9,40	10,80	13,20

Fonte: Vasconcelos (1983, p 42).

3.2 - Vinhaça no solo

A vinhaça apresenta certa quantidade de constituintes orgânicos, tais como glicerol e ácidos orgânicos (compostos estes de imediata degradação), que ao serem adicionados ao solo rapidamente se solubilizam e posteriormente passam pelo processo de mineralização para liberam os constituintes químicos solúveis que passam para solução do solo e depois podem ser por ele adsorvidos (MENDONÇA; MATOS, 2005), esses constituintes são importantes na mudança das características do solo, promovendo variação nas suas propriedades químicas e favorecendo no aumento da concentração dos nutrientes que são de interesse para as plantas (SANTOS et al., 2013).

A vinhaça quando usada como meio de fertilização do solo deve ser aplicada na lavoura de cana-de-açúcar, em quantidade previamente calculada de acordo com as características do solo, para evitar aplicação em excesso, tendo-se o cuidado de evitar o escoamento ou percolação para não ameaçar os mananciais hídricos (superficial e subterrâneo). A aplicação da mesma proporciona economia para o setor agroindustrial, uma vez que evita a aquisição de alguns adubos e fertiliza os solos, de tal modo que, dependendo da dosagem utilizada, poderá substituir totalmente a adubação com o potássio que o solo necessita, além da redução em gastos com fertilizantes nitrogenados e fosfatados (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983). Há, no entanto, carência de estudos a respeito do impacto da fertirrigação com vinhaça sobre o lençol freático, o que significa dizer que, se por um lado, o seu uso é uma vantagem agrônômica, por outro, é um risco desconhecido ao meio ambiente e às populações locais (ALVES, 2003).

Em algumas situações, a vinhaça é usada em dosagens altas (em áreas de sacrifício). Esta prática só é utilizada quando a unidade industrial não dispõe de recursos financeiros para realização de projetos de aproveitamento racional da vinhaça, então, a mesma é colocada em áreas próximas ao local de produção, a fim de evitar os custos para transportá-la até o campo (ROSSETTO et al., 2008).

A matéria orgânica pode ser considerada como fator preponderante na produtividade agrícola devido à influência que exerce sobre as propriedades, físicas, químicas e biológicas do solo (AZEREDO; MANHÃES, 1983), no momento em que é incorporada ao solo, imediatamente é infectada por diversas colônias de microrganismos (fungos, bactérias, protozoários, etc.) que a transforma em húmus e acontece o desencadeamento do processo de neutralização da acidez do meio, preparando, deste modo, o início da humificação. Assim, quando adicionada com a finalidade de servir como fertilizante, favorece também o desenvolvimento desses microrganismos, os quais atuam na mineralização, nitrificação, desnitrificação, imobilização (CAMARGO et al., 2008) na sua e fixação biológica do nitrogênio no solo (CANTERELLA, 2007; SILVA; MENDONÇA, 2007).

A vinhaça é um dos efluentes líquidos produzidos pela indústria sucroalcooleira que possui maior carga poluidora, com uma DBO variando de 20.000 a 35.000 mg L⁻¹, sendo que esta larga faixa da DBO depende da eficiência e condições tecnológicas da destilaria, pois, a eficiência da remoção proporcionada pela DBO no solo pode ser afetada por sua capacidade de infiltração e também pela presença de cobertura vegetal, deste modo, quanto maior cobertura vegetal existir maior será a sua capacidade de remoção. Essa eficiência tem sido constatada como elevada, mesmo em solos com alta capacidade de infiltração (ROSSETTO, 1987; BARROS, 2011).

A utilização contínua da vinhaça nos mesmos solos, ano após ano, entretanto, tem causado preocupação do ponto de vista ambiental, porque pode ocorrer grande concentração de cátions que cause saturação das cargas negativas do solo, e, conseqüentemente, a sobra de grandes quantidades de íons solúveis na solução, principalmente o potássio, ocasionando problemas de lixiviação de seus constituintes para águas subterrâneas (ROSSETTO et al., 2008).

3.3 - Atributos físicos do solo

A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo-pneu e solo-implemento na superfície e em profundidade. Essas tensões compactam as diferentes camadas do solo e, caso este carregamento exceda a resistência interna do solo, ocorrerão mudanças nas propriedades física das camadas mais profundas do solo (SILVA, 2003; CAMILOTTI et al., 2010).

3.3.1 - Densidade do solo

A densidade do solo dá informações a respeito do espaço poroso contido no volume global, apresentado pela arrumação (estrutura) das partículas minerais do solo (areias, argilas e silte), além de auxiliar no que se refere à diferenciação de um solo com certo grau de compactação e problemas de redução do espaço poroso a ser ocupado pelo ar e/ou pela água no perfil do solo (PEDROTTI et al., 2009a).

O termo compactação do solo se refere à compressão do solo não saturado, resultando num aumento da densidade devido à redução do volume dos poros (VEIGA, 2011).

A degradação da estrutura do solo devido à compactação tem provocado efeitos negativos nas propriedades física, química e biológica do solo, com prejuízos ao desenvolvimento das plantas e conseqüentemente na produção de alimentos (PEDROTTI et al., 2009b).

A relação entre o peso referente a um volume de solo, previamente conhecido, depois de secado em estufa a 105 °C origina o que se denomina de densidade do solo (DS), a qual dá informações a respeito do espaço poroso contido no volume global, apresentado pela arrumação (estrutura) das partículas minerais (areias, argilas e silte) e orgânica do solo, além de auxiliar no que se refere à diferenciação de um solo com certo grau de compactação e problemas de redução do espaço poroso a ser ocupado pelo ar e/ou pela água no perfil do solo, que, conforme relatam Pedrotti et al. (2009-a) é uma medida física que pode ser

determinada pela razão entre o peso de uma amostra do solo, depois de secada em estufa a 105 °C, pelo seu volume total indeformado.

Os valores obtidos nestas condições mostram que as densidades ficam assim distribuídas, nos solos arenosos estão entre 1.400 a 1.800 kg m⁻³, enquanto para solos de textura fina, mais argilosos, suas densidades variam de 900 a 1.600 kg m⁻³ (REICHARDT; TIMM, 2004). Por outro lado, OLIVEIRA et al. (2013) completam dizendo que os valores da DS são dependentes da textura, teor de matéria orgânica (MOS) e estrutura do solo, outrossim, a sua modificação afeta a estrutura do solo, a porosidade e, conseqüentemente, a difusão de gases como CO₂ e N₂O para atmosfera.

A partir da composição da força física chamada pressão obtém-se a equação:

$$P = FA^{-1} \quad (1)$$

onde:

P = pressão - (dyn cm⁻²),

F = força – (dyn),

A = área – (cm²).

A equação (1) mostra que, mediante o tráfego de máquinas sobre o solo, a pressão exercida aumenta em função da diminuição da largura do pneu, ou seja, aumenta em função da incidência da força na área de atuação do pneu da máquina. O reflexo do esforço recebido na superfície do solo será transmitido para o ponto de convergência entre os horizontes A e B, justamente por apresentarem diferenças nas texturas e, conseqüentemente, mudanças estrutural e textural nos horizontes, pois, a compactação adicional e a transmissão da tensão aplicada na superfície do solo refletem nas camadas mais profundas, pelo aumento da tensão de pré-consolidação e do coeficiente de compressibilidade na camada superficial do solo (DIAS JÚNIOR, 2000; PEDROTTI et al., 2001; VEIGA et al., 2006; REINERT et al., 2006).

A densidade do solo abaixo da linha de tráfego é significativamente elevada após o manejo de máquinas agrícolas sobre a área, condicionando a redução da macroporosidade e, conseqüentemente, a diminuição da condutividade hidráulica do solo (SILVA et al., 2003).

Rosa et al. (2003) constataram que em áreas submetidas ao sistema de plantio direto irrigado, essa atividade agrícola melhorou a densidade do solo, na profundidade de 30 cm.

Zolin et al. (2011) trabalharam em diferentes áreas e períodos (1, 2, 3, 4, 12 e 20 anos), aplicando $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça em Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com cana-de-açúcar, quando observaram que em todas as áreas, os maiores valores de DS foram obtidos nas camadas de 15 a 30 cm, com exceção da área que recebeu a vinhaça durante 12 anos, que apresentou o maior valor na camada superficial do solo (0-15 cm). Observaram, ainda, na área onde aplicou vinhaça durante 12 anos, a presença de uma camada de solo visivelmente compactada, o que pode ser explicada pelo aumento da DS nas camadas, uma vez que esta é a medida quantitativa mais direta da compactação.

Aplicando uma dosagem de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça em um Latossolo Amarelo Distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, Vasconcelos et al. (2012) constataram que as densidades do solo, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, na área que recebeu vinhaça praticamente não mudaram quando comparadas entre si, no entanto, quando as comparações foram feitas com as densidades do solo da área testemunha (mata), constataram que seus valores foram 48,57 e 34,71 %, respectivamente, superiores aos da área testemunha.

3.3.2 - Areia

As partículas do solo que têm entre 0,05 e 2,00 mm de diâmetro equivalente são classificadas como areia (grossa + fina). Na escala de classificação de frações granulométricas do solo, adotada pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, a areia grossa tem diâmetro de 2,00 a 0,20 mm, enquanto a areia fina tem entre 0,20 a 0,05 mm de diâmetro (FONTES; FONTES, 1992). São partículas minerais que tem

mais importância para os efeitos nas características físicas (densidade, porosidade, compactação, superfície específica, etc.) do que para as propriedades químicas do solo.

3.3.3 - Argila

A partícula argila se refere à menor fração mineral que compõe a granulometria do solo, é um material normalmente constituído, em sua maior parte, de minerais argilosos, formada de óxidos livres de ferro, alumínio e outros, além de minerais primários, trata-se de uma partícula de tamanho menor que 0,002 mm em diâmetro equivalente, formado por material granular fino, natural do solo, que desenvolve plasticidade com pequena quantidade de água e tem influencia nas propriedades físicas e químicas no solo (FONTES; FONTES, 1992).

Estudando o efeito da aplicação de vinhaça, na dose de 200 m³ ha⁻¹ em um Oxisol Vermelho Distrófico com textura argilosa, cultivado com cana-de-açúcar, Oliveira et al. (2013) observaram que os teores de argila praticamente não mudaram: na área onde a cana foi colhida com palha a variação foi de 608 g kg⁻¹ na área controle para 563 g kg⁻¹ do tratamento com vinhaça, enquanto para cana queimada, variou entre de 524 g kg⁻¹ (controle) para 511 g kg⁻¹ da área que recebeu vinhaça.

As cargas dos solos estão relacionadas aos fenômenos de superfície das partículas como: dispersão, floculação, capacidade de troca de cátions, capacidade de troca de ânions, adsorção de pesticidas e de metais pesados; tais cargas podem ser do tipo permanente, isto é, quando são originadas de minerais pelo mecanismo de substituições isomórficas, principalmente da fração argila, ou de cargas do tipo dependente de pH do meio, sendo comuns em solos tropicais altamente intemperizados, ricos em óxidos de ferro e de alumínio, que são comuns para os solos com cargas variáveis representando mais de 70 % da carga total presente nas amostras da superfície dos Latossolos (RAIJ, 2011; NOVAIS; MELLO, 2007; RIBEIRO et al., 2011).

As cargas das partículas existentes na interface sólido-solução do solo estão

relacionadas aos fenômenos de trocas na superfície específica, formando uma película de cargas em permanente movimento vibratório (energia cinética) e que não chegam a aderir à face do coloide para formar uma parede estática, em decorrência do equilíbrio de forças (centrífuga e centrípeta), formando a Dupla Camada Difusa (DCD), baseada na teoria de Gouy-Chapman (NOVAIS; MELLO, 2007, p.149), que é um modelo de distribuição dos íons na solução do solo, a partir da superfície de um coloide (partícula eletricamente carregada).

De acordo com Meurer et al. (2004), os coloides apresentam uma maior concentração de cátions na vizinhança imediata das suas superfícies, denominada de camada de Stern, a qual permite a formação de uma concentração de ânions praticamente igual a zero, em virtude de apresentarem a mesma carga dos coloides, formando uma camada difusa de íons em volta das partículas, de tal modo que diminui gradativamente a concentração de cátions, enquanto a de ânions aumenta, de forma que na solução do solo a concentração de ambos será igual.

No caso do solo, os coloides são os componentes da fração argila e da matéria orgânica. Esse modelo é descrito matematicamente pelas equações simplificadas especificadas a seguir (UYEDA, 2009, p. 27):

$$L = (K \times Z^{-1}) \times (\epsilon_0 \times D \times n_0^{-1})^{0,5} \quad (2)$$

sendo:

$$K = [k \times T \times (8 \times e^2)^{-1}]^{0,5} = 1,416 \times 10^8 \text{ J}^{0,5} \text{ C}^{-1} \quad (3)$$

em que

L = espessura da DCD (m),

k = constante de Boltzmann ($k = 1,380510^{-23} \text{ JK}^{-1}$),

T = temperatura Kelvin (298,18 °K),

e = carga unitária do elétron ($e=1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$),

Z = valência do íon em solução,

ϵ_0 = capacitância no vácuo ($8,854239 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{J}^{-1}\text{m}^{-1}$),

D = constante dielétrica ou a permissividade relativa do solvente – para água, a $25^\circ\text{C} = 78,54 - (\text{C}^2\text{J}^{-1}\text{m}^{-1}\text{C}^{-2}\text{J}^1\text{m}^1)$,

n_0 = concentração do íon (íons $\text{m}^{-3} = \text{mol L}^{-1} \times 6,02 \times 10^{23} \times 10^3$).

3.3.4 - Porosidade total do solo

Hipoteticamente, do ponto de vista físico, o solo é formado por 50% de partículas sólidas (minerais e orgânicas) e a outra metade constituída pela presença de poros, que deverá ser ocupada pelo ar e pela água em um equilíbrio dinâmico que é modificado periodicamente pelo quadrinômio da relação água-solo-planta-atmosfera (KLEIN; LIBARDI, 2002).

Com o rearranjo das partículas sólidas do solo, originando os poros contidos entre essas partículas para, formarem o espaço vazio a ser ocupado pelo ar e/ou água, de uma maneira harmônica para possibilitar a circulação da água e do ar com facilidade no perfil do solo, para que esse mecanismo no interior do solo interfira no dinamismo das reações químicas que ocorrem periodicamente nos minerais e sais existentes no solo (PEDROTTI et al., 2009a).

A porosidade total do solo (PTS) está diretamente ligada à quantidade de matéria orgânica presente no solo e inversamente proporcional à densidade do solo. Segundo Kiehl, (1979), a PTS pode ser melhorada pela adição de matéria orgânica, a qual reduz a densidade aparente e, conseqüentemente, aumenta a quantidade e tamanho dos espaços vazios entre as partículas do solo.

A aplicação de compostos orgânicos pode promover alterações nas propriedades físico-químicas do solo e benefícios às culturas, quando se encontram em baixa concentração, pois, os resíduos orgânicos se manejados adequadamente funcionam como condicionadores de melhorias nas propriedades do solo, favorecendo o aumento da porosidade, aeração, fertilização e retenção de água (ALCARDE et al., 1989).

A intensidade de tráfego de máquinas agrícolas e a ação da soleira dos implementos alteram a compressibilidade e a porosidade do solo nas profundidades

superficial, média e de corte dos implementos agrícolas (SILVA et al. 2003; CAMILOTTI et al., 2010).

Estudando dois tipos de solos (Argissolo e Espodossolo) que receberam vinhaça por 10 anos, Bebé (2009), praticamente não encontrou variações nos índices de porosidade, avaliados até os horizontes Bt₁ e E₂, respectivamente, com as profundidades de 100 cm.

Vasconcelos et al. (2012) observaram, em um Latossolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, que com uma dosagem de vinhaça de 300 m³ ha⁻¹, os teores da porosidade total do solo, quando avaliados nas profundidades de 0-20 (45,07 %) e 20-40 cm (43,01 %), praticamente não apresentaram diferenças quando comparados entre si, no entanto, quando foram comparados com os teores da porosidade da área de mata (testemunha) que foram 56,83 % (0-20 cm) e 40,54 % (20-40 cm), constataram que seus valores foram menores na primeira camada e um pouco maiores na última camada em 26,09 e 6,09 %, respectivamente.

3.4 - Atributos químicos do solo

Depois de passarem pelo processo de mineralização, os diversos íons que compõem a vinhaça atuam no complexo de troca de íons no solo de maneira semelhante à solução do solo, onde ocorre uma estreita correlação entre ambas no que se refere à permuta dos seus constituintes, permitindo com que haja a mesma adsorção dos íons contidos na vinhaça pela superfície das partículas minerais e orgânicas do solo. Considerando o sistema como um complexo de íons indiferentes, neste caso os íons se comportam como contra-íons ou co-íons interagindo com a superfície das partículas, mediante forças de atração ou repulsão das cargas elétricas por ligação eletrostática (RAIJ, 2011).

A força motriz e o modo como ocorrem às reações no solo dependem da natureza da região interfacial entre os minerais de argila e a solução do solo que recebeu vinhaça, acredita-se que pela quantidade e diversidade de íons (ânions e cátions) presentes na sua composição química, quando ela é aplicada ao solo ocasiona, na região interfacial das partículas sólidas (orgânicas e inorgânicas) e a

solução do solo, um quadro similar ao que ocorre na região da dupla camada eletrolítica, com destaque para a região interfacial dessas partículas (formadas de cargas negativas), como região de carga espacial (BRETT et al., 1996).

Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , além dos anions NO_3^- e Cl^- próximos à superfície das partículas não ultrapassam a interface sólido-líquido (RAIJ, 1995), porém ficam muito próximos da superfície do coloide (argila ou matéria orgânica). Esta aproximação é definida pela dupla camada difusa (DCD), baseada na teoria de Gouy; Chapman (NOVAIS et al., 2007, p 149).

De acordo com as características reativas que a vinhaça proporciona ao solo, é notável o papel que ela exerce como formadora de íons adsorvíveis nas superfícies das partículas do solo, formando ligações químicas de elevado potencial energético de íons como F^- , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e o SO_4^{2-} , em certas circunstâncias, dependentes do tratamento químico (pH) que é feito no vinho a ser destilado, tomando-se como exemplo o ácido fosfórico:



3.4.1 - pH

Os primeiros estudos envolvendo a aplicação de vinhaça nos solos foram conduzidos pela equipe do Prof. Jaime Rocha Almeida, na década de 1950 (ROSSETTO, 2008). Complementando esses estudos preliminares, Almeida et al. (1952) utilizaram a vinhaça no solo com cana-de-açúcar visando avaliar os efeitos da aplicação de doses que chegaram até $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, quando observaram que essas doses promoviam acréscimos no pH do solo, contrariando as expectativas existentes na época.

A acidez do solo é resultante do equilíbrio entre os fatores: intensidade (I), quantidade (Q) e capacidade (C) ou pelo poder tamponante desta acidez. O fator intensidade se refere à concentração efetiva de H^+ na solução do solo, enquanto o fator quantidade se relaciona com a concentração de H^+ e de Al^{3+} (e de outros cátions de caráter ácido como Fe^{2+} e Mn^{2+}) adsorvidos aos coloides e que podem ser desorvidos da fase sólida, como consequência da neutralização e precipitação desses cátions na solução do solo (SOUSA et al., 2007).

Acredita-se, também, que parte da amônia (NH_3) formada no solo reage com os íons H^+ da solução do solo e com íons H^+ dissociáveis do complexo coloidal, resultando no cátion amônio (NH_4^+), conseqüentemente, diminuindo a acidez que a vinhaça libera para o meio, como também outros íons que passarão a se ligar às partículas orgânicas e/ou minerais do solo (CORRER; NAJM, 2011).

Dentre os efeitos associados à adição de vinhaça ao solo está a elevação do pH, que, segundo Rodella et al. (1983), é transiente, podendo retornar aos valores originais, após determinado período de tempo.

De acordo com Leal et al. (1983) *apud* Rossetto (2008), a multiplicação de microrganismos acompanhada pelas transformações da matéria orgânica do solo, atuando principalmente no nitrogênio, através da redução do nitrato para nitrito, consomem os íons H^+ e tem como consequência a elevação do pH do solo.

Glória; Orlando Filho (1983) enumeraram os seguintes efeitos da vinhaça no solo: a) elevação do pH; b) aumento da disponibilidade de alguns íons; c) aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); d) aumento da capacidade de retenção de água e e) melhoria da estrutura física do solo.

A vinhaça deve ser vista, também, como agente do aumento da população e atividade microbiana no solo, sendo um dos motivos do pH dos solos tratados com vinhaça sofrer aumento (SILVA; RIBEIRO, 1998), principalmente em áreas cultivadas há mais tempo, embora nos primeiros dias após sua aplicação se constate uma redução considerável para, em seguida, elevar-se abruptamente, podendo alcançar valores superiores a 7; este efeito está ligado à ação dos microrganismos e ao efeito

da oxidação da matéria orgânica, gerando espécies reduzidas de oxigênio, que apresentam características básicas (ROSSETTO, 1987; ROSSETTO et al., 2008).

Nasir; Quereshi, *apud* Soobadar; Kwong (2012) aplicaram 740 t ha⁻¹ de vinhaça em solo com cana-de-açúcar e notaram que o pH foi reduzido de 8,10 para 7,50, para, posteriormente, elevar-se rapidamente, onde acreditam que esta condição tenha sido causada em função da ação dos microrganismos presentes no solo.

Logo após ser aplicada ao solo, a vinhaça provoca uma série de modificações nas características biológicas, físicas e químicas dos solos, condições estas que foram avaliadas, principalmente nos valores de pH, CTC, carbono orgânico e porosidade do solo (FONTES, 1987).

3.4.2 - Fósforo

O fósforo (P) é um elemento químico que se encontra na natureza em diversas formas e fontes como animais, vegetais e minerais de rocha, podendo ser permutado aos solos nas formas inorgânica e orgânica (P_o), sendo esta composta de fosfolipídios, açúcares, ácidos nucleicos e fosfatos de inositol (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), que em solos altamente intemperizados, como o caso do solo em consideração, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral e aos constituintes orgânicos como fonte deste nutriente para a biomassa, após sua estabilização físico-química (NOVAIS et al., 2007), estando presente nas concentrações que variam de 0,05 a 0,50 % da massa seca, praticamente todo P, quando existente no solo, está presente na camada de 0-20 cm, com frações que podem variar de 5 a 80 % (SANTOS et al., 2008).

Embora o teor de fósforo total dos solos se encontre, de modo geral, entre 200 e 3.000 mg kg⁻¹ de P, menos de 0,10 % desse total se encontra dissolvido na solução do solo, daí, Fardeau (1996), *apud* Novais et al. (2007, p. 479), acrescenta que em áreas submetidas a cultivos agrícolas, os valores de P em solução estão, com frequência, entre 0,002 e 2 mg kg⁻¹ de P nos solos, em outras palavras, Meurer

et al. (2004) completam afirmando que os teores de P total no solo são relativamente altos, mas na fração biodisponível está abaixo das exigências mínimas das culturas.

A característica dos solos ácidos é apresentar teores médios a altos de P total, mas baixos do biodisponível, devido a adsorção específica do fósforo nas superfícies dos óxidos de alumínio e de ferro, na forma de complexos de esfera-interna. Por outro lado, a quimissorção do P também pode ocorrer nos grupos OH⁻ expostos na superfície dos argilominerais (MEURER et al., 2004).

Por ser um elemento químico indispensável e também classificado como macronutriente para as plantas, na maioria dos solos brasileiros, especialmente em Alagoas, encontra-se presente com concentrações muito baixas, embora é absorvido pela planta em pequenas quantidades, mesmo quando se encontra em nível elevado no solo. Nesta ocasião é necessário que se adicione P por meio de fontes externas, inorgânicas (adubos) e/ou orgânicas (compostagem, esterco, adubação verde, resíduos agroindustriais, etc.), para somar à reserva já existente no solo (JACOMINE et al., 1975; MARINHO; ALBUQUERQUE, 1978).

Canellas et al. (2003), estudando o efeito da dosagem de 120 m³ ha⁻¹ de vinhaça em um Cambissolo háplico Ta eutrófico vértico que recebeu a dosagem anualmente durante 35 anos, observaram que os teores de P foram 255,74 % e 106,67 %, respectivamente para as profundidades de 0-20 e 20-40 cm, quando comparados com a área que não recebeu vinhaça.

A vinhaça, a exemplo dos demais compostos orgânicos utilizados na agricultura, fornece o fósforo orgânico (P_o) ao solo, por ocasião da sua aplicação. O P_o, que é expresso em porcentagem de P total, pode variar de 15 a 80 %. Na forma de fosfolípidios, as concentrações variam em torno de 5 % do P_o, enquanto na forma de ácidos nucleicos pode atingir valores de 2,50 % (SANTOS et al., 2008).

A aplicação da vinhaça durante um período de 20 anos causou aumentos significativos nos teores de P disponível nos solos, variando de 5 mg dm⁻³ nos primeiros centímetros da camada do solo de mata que foi tomado como referência, para 162,60 mg dm⁻³ no solo onde foi aplicado o resíduo, mostrando que os teores

de P foram elevados após a aplicação da vinhaça, principalmente nos primeiros centímetros do solo (MACHADO et al., 2011).

Em alguns solos, a lixiviação da MOS pode proporcionar efeitos significativos aumentos no teor de P, foi então que Schoenau; Betany (1987) *apud* Leal et al, (2008), estudando esta lixiviação em três diferentes tipos de solos, observaram que a proporção de P extraível da fração de ácidos fúlvicos aumentava com a profundidade, sugerindo que os compostos orgânicos mais ricos nesses elementos são de mais fácil lixiviação do que os compostos mais pobres. Isso pode explicar a diminuição da relação C/P com o aumento da profundidade observada nestes solos. Esses autores salientaram que a lixiviação de formas orgânicas pode ser um importante mecanismo de perda do nutriente.

3.4.3 - Potássio

O potássio (K^+) total representa o somatório de todas as formas de K^+ em determinado solo, varia muito de solo para solo, de acordo com o material de origem, da composição mineralógica, do grau de intemperismo e do manejo que envolve o nutriente. Mesmo assim é um dos nutrientes mais abundantes nos solos, encontrando-se, segundo Sparks (2000), a sua maior concentração (em torno de 98 %), na estrutura dos minerais primários e secundários (K^+ estrutural), e só uma pequena fração se encontra na forma mais prontamente disponível para as plantas, seja na forma de K^+ trocável, ou seja, disponível na solução do solo (ERNANI et al., 2007).

O K^+ é absorvido pelas plantas na sua forma catiônica, pelo seu mecanismo de deslocamento no solo, podendo chegar até as raízes basicamente pelo fluxo de massa, juntamente com a difusão (ERNANI et al., 2007); já que a interceptação radicular, outro mecanismo que as raízes utilizam para buscar o nutriente que a planta necessita, contribui com menos de 5 % da demanda de K^+ que as plantas absorvem.

Algumas modificações nas propriedades químicas do solo, provenientes da aplicação de compostos orgânicos podem promover benefícios às culturas

(ALCARDE et al., 1989), embora a vinhaça apresente todos os elementos químicos necessários para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO et al., 1983), estes compostos se encontram em baixa concentração, à exceção do potássio.

Para se considerar a aplicação de vinhaça no solo como uma fertirrigação completa, há necessidade de complementação com alguns macronutrientes, como nitrogênio, fósforo e cálcio (SILVA, 1983). Como se sabe, os resíduos orgânicos quando manejados adequadamente funcionam como condicionadores de melhorias nas propriedades do solo, favorecendo o aumento da produtividade agrícola (ALCARDE et al., 1989).

Canellas et al. (2003), trabalhando em Cambissolo Háplico Ta Eutrófico vértico que recebeu cerca de $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça durante 35 anos, verificaram aumentos significativos de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e CTC, quando avaliados na camada superficial de 0-20 cm, porém, na camada de 20-40 cm de profundidade, apenas o Mg^{2+} não sofreu alteração, enquanto os demais atributos apresentaram reduções significativas de seus valores.

Cunha et al. (1981), ao estudar a utilização de vinhaça como fertilizante organomineral e condicionador de solos, observaram que a acumulação de potássio no perfil do solo não foi significativa ao ponto de ser considerada elevada, ficando este elemento retido na camada de 0,50 m de profundidade, sendo que sua lixiviação foi pequena, acompanhando a drenagem interna no perfil do solo.

Quando a vinhaça é aplicada em doses crescentes, aumenta a concentração de K^+ trocável, principalmente nas camadas mais superficiais do Argissolo, fato registrado por Brito et al. (2007) e por Bebé (2009), quando dizem que os elevados teores de K^+ no complexo sortivo do solo podem acarretar acréscimos também na solução do solo, que poderá proporcionar a lixiviação do nutriente em profundidade. Entretanto, mesmo com os efeitos benéficos da vinhaça no solo, sabe-se que, quando aplicada em altas doses, conduz a efeitos indesejáveis, como cinzas no caldo, comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar e problema na fabricação do açúcar (UNESP, 2007; JUNQUEIRA et al., 2009)

A lixiviação de K^+ para a subsuperfície não seria um problema ambiental, uma vez que o K^+ não é um elemento químico poluente da água. O problema é a respeito de sua alta concentração que favorece a formação de sais que, com carga neutra, são facilmente lixiviados, agora, quando o composto é formado entre o K^+ e o NO_3^- , é especialmente preocupante do ponto de vista ambiental, porque o nitrato, sim, é um grande poluente de águas subterrâneas (ROSSETTO, 2008).

O Estado de São Paulo disciplina o uso da vinhaça pela regulamentação normativa nº 4.331, só permitindo a aplicação do resíduo quando a quantidade máxima de potássio preenche até 5 % da CTC do solo, sendo este parâmetro é adotado pela CETESB (2005) como o valor referencial para liberar a aplicação de vinhaça na área.

Conforme constataram Soobadar; Kwong (2012), uma única aplicação de 50 t ha^{-1} de vinhaça em um solo cultivado com cana-de-açúcar forneceu uma quantidade de K^+ suficiente para que a cultura produzisse por um tempo mínimo de duas colheitas. Ainda, de acordo com os mesmos autores, trabalhando com vinhaça na dosagem de 100 $m^3 ha^{-1}$, nas ilhas Maurício, observaram que o teor de K^+ no solo foi de 1 $cmol_c kg^{-1}$, quando coletado um mês após a aplicação do resíduo, porém este valor foi reduzido à metade quando o solo foi coletado 12 meses depois da aplicação da vinhaça, e, decorridos 24 meses o teor do nutriente baixou para apenas 0,43 $cmol_c kg^{-1}$.

3.4.4 - Cálcio + Magnésio

O principal constituinte da vinhaça é a matéria orgânica coloidal, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos. Em menor quantidade, encontram-se cátions como K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , sendo que sua riqueza nutricional está ligada à origem do mosto irá gerar o vinho. Quando se parte de mosto de melação, as concentrações em matéria orgânica e minerais (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) são elevadas, ao passo que esses componentes decrescem consideravelmente quando se refere ao mosto de caldo de cana, como é o caso se for produzido em destilarias autônomas, onde o processo acima se passa apenas com o caldo servindo de matéria prima formação do mosto e

posteriormente para fabricação do álcool (SILVA et al., 2007), ao passo que o mosto misto tem valores intermediários entre os dois mostos citados anteriormente.

Documentário da UNESP (2007) traz relato de um experimento conduzido por Cruz et al. (1990) que propunha avaliar períodos que se estenderam até quinze anos (5, 10 e 15 anos) de uso da vinhaça no solo. Os resultados mostraram que a dosagem de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ aumentou os teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ não apenas na superfície, como também nas camadas mais profundas do solo.

Zolin et al. (2011) estudaram o efeito da vinhaça de mosto misto, em diferentes tipos de solos com cana-de-açúcar e em diferentes épocas de aplicação, ou seja, era feita apenas uma aplicação por ano em cada área, correspondente à dose de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, efetuada por canhão autopropelido, com taxa média de $12,50 \text{ mm h}^{-1}$, de tal maneira que o estudo foi desenvolvido em sete áreas assim programadas: área 1 - sem vinhaça, área 2 – uma aplicação (1 ano), área 3 – duas aplicações (dois anos), área 4 – três aplicações (três anos) , área 5 – quatro aplicações (quatro anos) , área 6 – doze aplicações (doze anos) e área 7 – vinte aplicações (vinte anos) e encontraram relações para Ca^{2+} e Mg^{2+} em torno de 3 a 5:1, as quais são consideradas como apropriadas para manter um equilíbrio no solo, quando já se tem condições ideais e da relação de K : Mg : Ca, condição que foi confirmada por Vitti; Mazza (2011) quando verificaram que a relação K : Mg : Ca ideal para o solo é de 1 : 3-5 : 9-25.

Em estudos realizados por Soobadar; Kwong (2012) nas Ilhas Maurício, verificaram, após aplicação da dosagem de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça no solo com cana-de-açúcar, que o teor de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ no solo foi de $5,15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, quando coletado 1 mês após a aplicação do resíduo, porém este valor foi reduzido para $4,95 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ quando o solo foi coletado 12 meses depois da aplicação da vinhaça, e, decorridos 24 meses, o teor do nutriente baixou para apenas $4,10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

3.4.5 - Matéria orgânica do solo

A formação dos solos se dá a partir da interferência do clima, do relevo, da influência do tempo sobre a rocha matriz da litosfera e a parte orgânica é formada

pela decomposição de animais e/ou vegetais. Partindo-se desse princípio, é possível verificar que a interferência desses reinos é fundamental na formação e acumulação da MOS, que pode ser definida, em um sentido mais amplo, resíduos de plantas e animais pouco ou bem decompostos pelo tempo de permanência no ambiente, que passam pelos estágios fíbrico (*fibra*; fibra), hêmico (*hemi*; metade) e sáprico (*sapros*; podre) (ANJOS et al., 2008). Nos solos tropicais, os atributos físicos e químicos da matéria orgânica são essenciais para a manutenção da saúde dos ecossistemas dos quais fazem parte (KIEHL, 1985).

Os compostos poderão estar presentes no solo em diferentes estágios e percentuais, tanto em estágio de transformação intermediário (hêmico), como acontece com solos que recebem vinhaça que imediatamente passa por uma transformação bioquímica desencadeada pela microbiologia do solo, e em seguida por uma transformação da matéria orgânica coloidal em um material com características próximas ao estágio sáprico desta matéria orgânica (ANJOS et al., 2008).

O carbono no solo pode estar na forma orgânica (polissacarídeos, ácidos graxos, aminoácidos, polifenóis, etc.) ou inorgânica (carbonato, bicarbonato e óxidos), de tal maneira que nos solos agrícolas varia de 0,20 a 5,00 dag kg⁻¹ (MENDONÇA; MATOS, 2005). Em solos ácidos que não tenham recebido calagem, a quantidade de carbono inorgânico presente é insignificante, enquanto o carbono orgânico é encontrado na biomassa dos microrganismos, nas substâncias húmicas, nos resíduos animais e vegetais em diferentes estágios de decomposição e em materiais inertes como carvão vegetal ou mineral (MENDONÇA; MATOS, 2005; ANJOS et al., 2008).

No solo há três reservatórios funcionais de MO: o primeiro é denominado de ativo, que consiste pelos restos de vegetais e animais possíveis de serem decompostos, possibilitando a liberação de nutrientes e posterior proteção de sua lixiviação; o segundo é lento ou fisicamente protegido, representado pela MO associada com os agregados do solo e que está inacessível ao ataque dos microrganismos, aumentando a capacidade de troca de cátions (CTC) e a disponibilidade de nutrientes; o terceiro é o passivo, que é formado por compostos

como lignina, polifenóis, etc. resistentes à decomposição (RESCH et al., 1996, *apud* KLUTHCOUSKI; STONE, 2003, p. 73).

Devido ao grande aporte de matéria orgânica, que diminui o risco da lixiviação de cátions e o aumento dos teores de macronutrientes no solo (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983), a matéria orgânica coloidal contida na vinhaça lhe confere características similares aos efeitos eletrostáticos (atração por cargas negativas) que criam um ambiente propício para diminuir o potencial de lixiviação de cátions no solo (FREIRE; CORTEZ, 2000).

A complexação e a reação redox dos elementos ativos na solução do solo são influenciadas fortemente pela presença da MOS, constituinte principal da composição da vinhaça, presente, basicamente, sob a forma de ácidos orgânicos. A característica da matéria orgânica está diretamente relacionada com o tipo de mosto que a originou (SILVA et al., 2007).

O conteúdo e a qualidade da matéria orgânica constituem atributos dos solos que podem ser utilizados para avaliar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (MIELNICZUK, 1999). As diferentes frações de carbono orgânico humificado do solo apresentam características químicas, físicas e morfológicas diferenciadas entre si, e a distribuição destas frações podem indicar a qualidade da matéria orgânica presente no solo (CANELLAS et al., 2003).

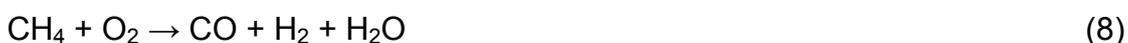
A ação do solo na redução da MOS foi, de maneira geral, mais efetiva na camada superficial de 10 a 15 cm e, em decorrência da aplicação de vinhaça, de forma mais intensa, até a profundidade de 24 cm, conforme observado por Lyra et al. (2001) *apud* Lyra et al. (2003).

O resultado da emissão de gases do efeito estufa pode ser resultante das decomposições aeróbia e anaeróbia da matéria orgânica da vinhaça que ocorre durante o transporte, estocagem temporária em lagoa de decantação e depois na aplicação no solo (OLIVEIRA et al., 2013). Os processos biogênicos são resultados de reações químicas realizadas por bactérias anaeróbias (*Archaeobacteria*) durante a decomposição de matéria orgânica. Estas bactérias são denominadas de

metagênicas (família Methylococcacea) e vivem no interior da terra produzindo gás metano, criando ecossistemas, com formas de vida bizarras e ainda muito pouco estudadas, como as comunidades quimiossintéticas. Elas obtêm energia pela redução do dióxido de carbono, acetato, formato, metanol, CO, etc. Podem viver em ambientes extremamente hostis: com alta temperatura, hipersalinidade e valores extremos de pH. Contudo, estas bactérias só produzem metano em ambiente anóxico (OLIVEIRA et al., 2013).

Em recente estudo, Carmo et al., (2012) *apud* Oliveira et al. (2013) observaram que a aplicação de vinhaça de cana-de-açúcar resultou em aumento significativo na emissão de gases do efeito estufa, especialmente o óxido nitroso (N₂O). Estes autores também observaram que a presença de palha na superfície do solo aumentou a emissão de CO₂, N₂O e não influenciou no fluxo de CH₄ resultante da aplicação de vinhaça (OLIVEIRA et al., 2013).

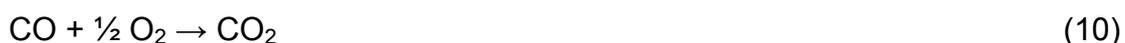
Na combustão do metano, diversas etapas são envolvidas. O processo é chamado pirólise:



Seguindo a pirólise oxidativa, o H₂ se oxida, formando H₂O, reabastecendo a espécie ativa, e liberando calor. Isto acontece muito rapidamente, geralmente em menos de um milissegundo.



Finalmente, o CO oxida-se, formando CO₂ e liberando mais calor. Este processo é geralmente mais lento que o outro processo químico e precisa de alguns poucos milissegundos para acontecer.



A combustão completa do metano é altamente exotérmica e libera 280,4 kcal mol⁻¹, sendo assim representada:



A matéria orgânica particulada que é filtrada pelo solo será dissolvida e quando percolada pelo mesmo é parcialmente degradada pelos microrganismos heterotróficos que conferem ao sistema, como um todo, a habilidade de utilizar e degradar a maior parte dos compostos orgânicos sob as mais diversas condições (LYRA et al., 2003).

Quando aplicou vinhaça em um Latossolo com cana-de-açúcar, utilizando doses do resíduo que foram até $1.200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, Andrioli (1986) verificou que não houve alteração no teor de MOS. Por outro lado, Canellas et al. (2003) verificaram que houve aumento do teor de carbono orgânico em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar após 35 anos de aplicação de vinhaça.

Os estoques de MOS em qualquer agroecossistema são obtidos pela interação dos fatores que determinam sua formação e aqueles que promovem sua decomposição (LEITE et al., 2003), a tal ponto de estabelecer um declínio no estoque de MOS após a conversão de florestas nativas em sistemas agrícolas, conforme relatado por Houghton et al. (1991), *apud* Leite et al. (2003), atribuindo-se essa redução ao aumento da erosão de solo, aos processos mais acelerados de mineralização da MOS e oxidação do carbono orgânico do solo e às menores quantidades de aportes orgânicos em sistemas manejados comparativamente às florestas nativas.

3.4.6 - Carbono solúvel em água

O Carbono solúvel em água (CSA) é um atributo estimativo das formas solúveis de carbono presentes no solo, e, possivelmente, de muito fácil perda e degradação. Por isso, pode ser utilizado como indicador fundamental da qualidade ou das alterações nas condições naturais que ocorrem no solo (SILVEIRA, 2005; GOMES, 2008). É uma forma lábil, facilmente perdida, e tem em sua constituição carboidratos, ácidos orgânicos de baixo peso molecular e uma pequena fração de ácidos fúlvicos (STEVENSON, 1994), onde o seu teor indica, de uma maneira geral, a quantidade de biomoléculas, ácidos fúlvicos e ácidos húmicos (e seus complexos) dissolvidos na solução do solo (MEURER; ANGHINONI, 2004, p. 106).

Como o CSA é considerado a forma mais lábil e ativa da matéria orgânica, seus teores no solo dependem, principalmente da atividade microbiana e do aporte orgânico do resíduo que serviu como fonte a ser utilizada (STEVENSON, 1994; GOMES, 2008), concordando com Oliveira Júnior et al. (2008) apud Silva et al. (2010) quando dizem também que o CSA é uma forma de C lábil cuja concentração no solo é regulada por atributos como qualidade e teor de matéria orgânica no solo, acidez, disponibilidade de nutrientes, mineralogia e fatores ligados à comunidade microbiana do solo, complementando com Meurer; Anghinoni, 2004, ao adiantarem que o CSA dissolvido na solução do solo é um componente que afeta a composição química, as formas (especiação) e a atividade dos íons que se encontram na solução do solo.

O termo “carbono orgânico dissolvido (COD)” compreende uma variedade de moléculas orgânicas de baixo peso molecular, dissolvidas na solução do solo, e moléculas de alto peso molecular, suspensas como coloides em suspensão, resultantes da atividade bioquímica de organismos vivos, incluindo os exsudatos das plantas, e dos produtos da decomposição microbiana da matéria orgânica. Estas moléculas podem estar com cargas (negativas ou positivas) ou neutras. Assim, elas podem estar adsorvidas aos sítios de trocas da fase sólida do solo, formar complexos com óxidos de ferro e alumínio e os compostos orgânicos sem carga podem ser adsorvidos em sítios hidrofóbicos da matéria orgânica do solo (MEURER; ANGHINONI, 2004, p. 106-8).

Dentre as formas de carbono lábil existentes no solo, a mais importante é o CSA (SILVA; MENDONÇA, 2007), pois esta fração lábil da MO é um sensível indicador das mudanças na matéria orgânica do solo devido às práticas agrícolas, reduzindo rapidamente quando o solo passa de um sistema natural como mata nativa para um solo cultivado (SILVA, 2003).

Quando comparada com a MOS, a fração mais prontamente disponível, como o CSA, é mais sensível à mudança no manejo do solo a curto e médio prazo e, portanto, pode ser utilizada como indicador fundamental de qualidade do solo ou das alterações das condições naturais. Embora a fração dissolvida represente apenas uma pequena porção da matéria orgânica total do solo, o CSA é móvel no solo e

constitui uma importante fonte de carbono para os microrganismos (GOMES, 2008; SILVEIRA, 2005).

Trabalho realizado por Lima (1996), utilizando diferentes doses de composto orgânico (formulado a partir de bagaço de cana-de-açúcar, dejetos de suínos e gesso, na proporção de 10/5/1, respectivamente) em Podzólico câmbico, mostrou que o CSA apresentava pequena elevação com o aumento da dosagem do composto orgânico, a partir de $11,40 \text{ t ha}^{-1}$ para profundidade até 10 cm, constatando igual comportamento na profundidade de 10-30 cm, isto para uma amostragem feita aos 25 dias após a incorporação do composto orgânico. Em segunda fase, 50 dias após a colocação do composto orgânico, o comportamento do CSA foi o contrário, à medida que aumentava a dose do composto orgânico, para ambas as épocas de amostragens, diminuía a presença de CSA no solo.

Estudando florestas na Alemanha, Borcken et al. (2004) *apud* Gomes (2008) verificaram aumento na quantidade acumulada de CSA na profundidade de 0 a 10 cm, durante um período de 32 meses. Observaram, ainda, que essas perdas foram fortemente limitadas pela profundidade do solo e que os solos minerais retiveram grandes quantidades de CSA entre 10 a 100 cm, reduzindo, assim, sua passagem para o lençol freático (GOMES, 2008).

3.4.7 - Saturação de Potássio na CTC

A saturação de Potássio na CTC ($\% K_{CTC}$) diz respeito ao percentual de K^+ trocável que é adsorvido especificamente por esse cátion à CTC do solo, para essa faixa ser ocupada pelo K^+ , variando de 3 a 5 % da superfície específica dos colóides que compõem a CTC do solo, para adsorver o K^+ que está disponível na solução do solo (sendo 3 % para os solos arenosos e 5 % para os argilosos), conforme afirmam alguns autores como Gargantini et al. (1970); Raij (1975); Lopes (1989); Malavolta (1992).

3.4.8 - Capacidade de Troca de Cátions

O solo pode variar a sua capacidade de troca de cátions (CTC) de um valor baixo até um elevado, a depender da presença de matéria orgânica e do tipo de

partícula argilomineral nele presente; quando esta é constituída pelo mineral secundário caulinita e/ou ilita, que têm, em geral, baixa densidade de cargas negativas na superfície específica, o que, conseqüentemente, confere a esses solos uma baixa CTC. Por outro lado, solos que contêm maiores concentrações de filossilicato, montmorilonita e/ou vermiculita mostram alta reatividade química, visto que apresentam CTC elevada, porém, quando há MO no sistema, a sua contribuição é tanto maior quanto menor for a contribuição da fração mineral (CANELLAS et al., 2003).

A CTC é bem definida pelo somatório dos cátions que compõem o complexo sortivo do solo, sendo composta por cátions que servem como: nutrientes para as plantas, dispersantes para as partículas minerais, corretivos para acidez, com funções tóxicas para as plantas e acidificantes para os solos (RAIJ, 2011).

Algumas modificações nas propriedades químicas do solo, provenientes da aplicação de compostos orgânicos podem promover benefícios às culturas (ALCARDE et al., 1989). Embora a vinhaça apresente todos os elementos químicos necessários para o desenvolvimento da cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO et al., 1983), estes compostos se encontram em baixa concentração.

Para se considerar a aplicação de vinhaça no solo como uma fertirrigação completa, há necessidade de complementação com alguns macronutrientes, como nitrogênio, fósforo e cálcio (SILVA, 1983).

Como se sabe, os resíduos orgânicos quando manejados adequadamente funcionam como condicionadores de melhorias nas propriedades do solo, favorecendo o aumento da produtividade agrícola, e, sobretudo o aumento da capacidade de retenção de cátions (ALCARDE et al., 1989).

A capacidade de troca de cátions (CTC) de húmus é definida como a soma de cátions trocáveis adsorvidos por unidade de massa de húmus a um determinado pH. É expressa em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de húmus, ou seja, pela quantidade de moles de carga protônica dissociável por massa de húmus, determinada pela titulação do excesso de um cátion como índice (CANELLAS et al., 2003).

De acordo com citação de Silva (2012), a CTC do solo varia na razão direta dos teores de argila e matéria orgânica existentes no solo, assim, a aplicação de vinhaça no solo confere incremento na quantidade de cargas negativas, proporcionando menor lixiviação de cátions e melhorando a fertilidade do solo (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983), que tende a se manter por um longo tempo; com consequente aumento da produtividade de cana-de-açúcar, conforme relatos de vários pesquisadores em diversas condições de solo e clima (ORLANDO FILHO et al., 1983).

Muitos autores estudaram os efeitos da vinhaça nos solos e, ao longo do tempo, concluíram que a vinhaça aumenta a CTC, aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes, sendo que sua elevação ocorre pelo grande aporte de matéria orgânica representado pela adição de vinhaça, pois, pela característica coloidal da matéria orgânica nela contida, sua adição confere ao solo uma maior quantidade de cargas negativas que diminuem a lixiviação de cátions e consequentemente aumentam a CTC do solo (UNESP, 2007).

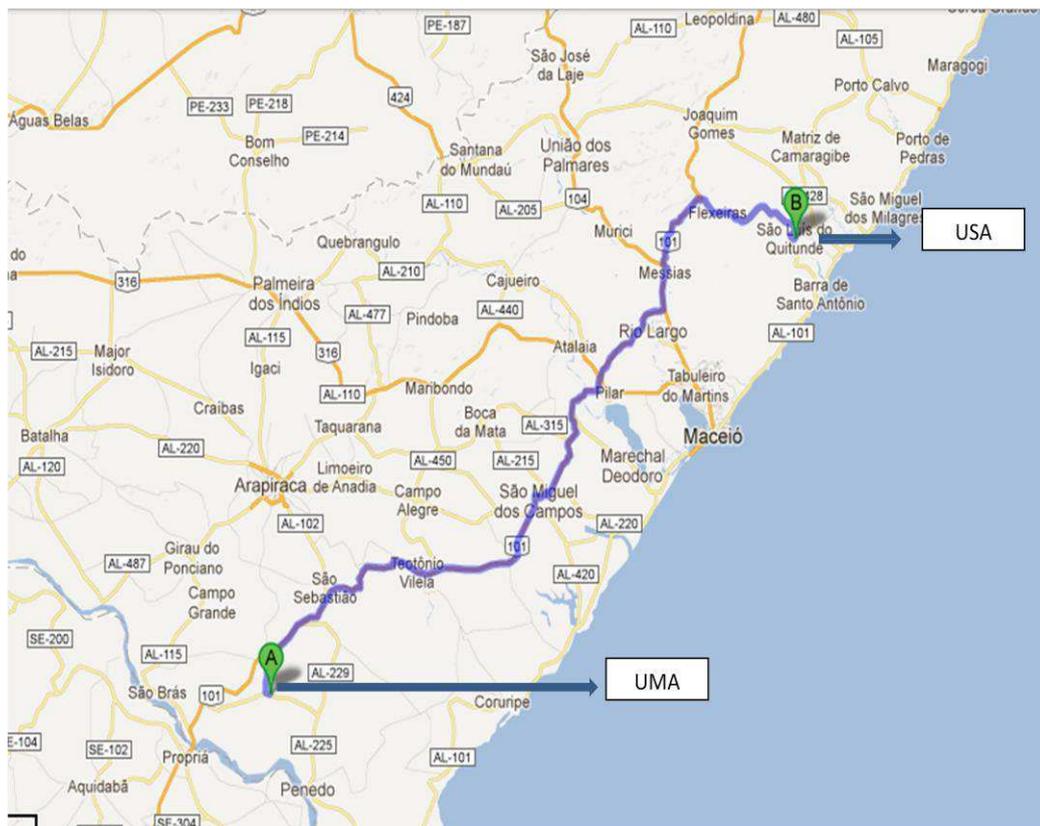
Barros et al. (2011), estudando os efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas de solo cultivado com cana-de-açúcar durante um período de dez anos, concluíram que a vinhaça alterou positivamente as propriedades químicas do solo, melhorando a sua fertilidade. Os autores notaram aumentos significativos da CTC nas três profundidades estudadas (0-15, 15-30 e 30-45 cm).

4 - MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - Localização da área experimental

Os trabalhos foram conduzidos em duas usinas de açúcar da região canieira de Alagoas (**Figura 1**), sendo escolhidas duas áreas agrícolas em cada usina, de tal modo que uma das áreas já vem recebendo vinhaça anualmente há mais de 25 anos, enquanto a outra que serviu de testemunha, pois nunca recebeu vinhaça, apenas recebia adubação mineral, conforme recomendação prevista pela análise de fertilidade do solo.

Figura 1 - Região canieira do Estado de Alagoas com os locais onde foram conduzidos os trabalhos: na região Sul está localizada a Usina Marituba e na região Norte a Usina Santo Antonio.



Fonte: <http://www.google.com.br/área canieira/>

A primeira parte do estudo foi desenvolvida em uma área de tabuleiro costeiro, plantada com socaria de cana-de-açúcar, pertencente à Usina Marituba (UMA), localizada no município de Igreja Nova – AL no sul da região canieira do

Estado de Alagoas (**Figura 1**), compreendendo as seguintes coordenadas geográficas: com Latitude de 10°08'S, Longitude de 36°39'W e o clima da região é classificado como As' de Köppen, isto é, tropical quente e úmido com estação seca na primavera e no verão; e com período chuvoso no outono e no inverno, sendo entre os meses de julho e agosto o maior período de concentração de chuvas. A precipitação média anual de 25 anos foi de 1.402 mm, enquanto a temperatura média anual é de 25 °C.

A primeira amostragem de solo foi feita na UMA, no período de 11 a 27 de dezembro de 2011, nas trincheiras abertas em um Argissolo Amarelo distrófico, coeso, em uma área de relevo plano, com textura médio-argilosa, oriunda de formação sedimentar do grupo Barreiras (EMBRAPA, 2010), no solo que recebeu vinhaça durante 25 anos e também no que serviu de testemunha.

A segunda parte do estudo foi desenvolvida em uma área de chã que estava plantada com socaria de cana-de-açúcar, pertencente à Usina Santo Antonio (USA), localizada no município de São Luiz do Quitunde – AL, na região canavieira do norte do Estado de Alagoas (**Figura 1**), com as seguintes coordenadas geográficas: Latitude de 9°19'S, Longitude de 35°36'W e o clima da região é classificado como As' de Köppen, isto é, tropical quente e úmido com estação seca na primavera e no verão; e com um período chuvoso que coincide com o outono e o inverno. A precipitação média anual de 25 anos foi de 2.058 mm, enquanto a temperatura média anual foi de 24,50 °C.

A segunda amostragem foi feita no período de 10 a 25 de fevereiro de 2012, em trincheiras abertas num solo classificado como Argissolo Amarelo distrófico, coeso, relevo suavemente ondulado, com horizonte A moderado de textura média-argilosa, oriundo de formação sedimentar Alagoas, arenitos e conglomerados (JACOMINE et al., 1975; EMBRAPA, 2010), no solo que recebeu vinhaça durante 25 anos e naquele que serviu de padrão.

4.2 - Coleta do solo

4.2.1 - Abertura das trincheiras

As amostras de solos foram coletadas em oito trincheiras (**Figuras 2 e 3**) na UMA em dezembro de 2011, sendo que quatro dessas trincheiras foram abertas na área sem vinhaça, para servir como testemunha, enquanto as outras quatro foram abertas na área que recebeu o resíduo.

Figura 2 - Máquina que foi utilizada para fazer as trincheiras nas áreas.



Fonte: autor, 2011

As amostras de solos foram coletadas nas mencionadas trincheiras (**Figura 3**) e nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-70 e 70-100 cm de ambas as áreas (com e sem vinhaça).

Ao todo foram coletadas em cada Usina quarenta amostras de solos desestruturadas, as quais foram encaminhadas ao laboratório para os devidos procedimentos de secagem, peneiramento e posterior realização das análises físicas e químicas.

Figura 3 - Marcação das camadas no perfil do solo.



Fonte: autor, 2011

4.2.2 - Aplicação da vinhaça

A área escolhida na UMA já vinha sendo monitorada com a aplicação de vinhaça (tratamento) desde o ano de 1986, área que antes era mata nativa, passando a receber o resíduo até a época da amostragem do solo, portanto com 25 anos consecutivos, sem interrupção, recebendo uma dosagem anual de cerca de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça (com uma concentração média de $1,63 \text{ kg m}^{-3}$ de K_2O)¹, que era aplicada na área total mediante um sistema de irrigação por aspersão (**Figura 4**), sendo que a operação de colocação da vinhaça no solo era feita logo após a colheita da cultura, no ato dessa operação era feita uma adubação mineral com 1 kg de nitrogênio por cada tonelada de cana colhida no campo, suprimindo, portanto, a colocação de fósforo e micronutrientes.

¹ Glênio Fireman Tenório – Gerente agrícola da UMA. Comunicação pessoal (valor médio proveniente de 25 resultados de análises de vinhaça).

Figura 4 - Transporte da vinhaça por canal para irrigar por aspersão.



Fonte: autor, 2011

Com a composição média de $1,72 \text{ kg m}^{-3}$ de K_2O^2 , era aplicada a cada ano

Figura 5 - Transporte da vinhaça por caminhão-tanque.



Fonte: autor, 2011

uma dosagem aproximada de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça, por meio do sistema de irrigação por caminhão tanque (**Figura 5**), acompanhada de adubação mineral com 80 kg ha^{-1} de Nitrogênio, logo após a colheita da cana-de-açúcar.

² Wellington. Técnico da área de irrigação e tratos culturais da USA. Comunicação pessoal (valor proveniente de uma média de 25 resultados de análises).

4.2.3 - Preparo do solo no laboratório

As amostras dos solos foram enviadas ao Laboratório de Análises de Produtos Agropecuários (LAPA/CECA/UFAL) para realização das análises químicas e ao Laboratório de Água e Energia (LAE/CECA/UFAL) para realização das análises físicas.

Nos laboratórios, as amostras passaram pelo processo de secagem ao ar, originando a Terra Seca ao Ar (TSA), que foram destorroadas e passadas na peneira ABNT 10 (2 mm), para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) e em seguida foram acondicionadas em bolsas de papel, com um peso aproximado de 1,50 kg por cada amostra para serem destinadas às respectivas análises nos laboratórios (KIEHL, 1979).

4.2.4 - Determinações no solo para obtenção dos atributos físicos

Para as determinações feitas no solo para obtenção dos atributos físicos, foram utilizadas parte das amostras deformadas de TFSA, antes preparadas para análises químicas.

O trabalho no campo foi feito com o cilindro de Uhland (altura de 3,80 cm e diâmetro de 4,50 cm), o qual era utilizado para coleta das amostras estruturadas, que seriam destinadas às determinações das densidades do solo.

4.2.4.1 - Densidade do solo

A densidade do solo (DS) foi determinada pelo método de campo (**Figura 6**), mediante a coleta, em cada trincheira, de cinco amostras estruturadas de solos, nas profundidades mencionadas no item 4.2.1, coletadas com o cilindro de Uhland (volume = 60,4364 cm³), para serem encaminhadas ao laboratório.

No laboratório foram colocadas na estufa para secar, a uma temperatura de 105°C durante 72 h, decorrido esse tempo foram colocadas em dessecador para esfriar. Em seguida foram pesadas e o peso foi dividido pelo volume do cilindro para se determinar a DS.

Figura 6 - Amostras estruturadas coletadas na trincheira com o cilindro de Uhland.



Fonte: autor, 2011.

4.2.4.2 - Areia

As areias (grossa e fina) foram determinadas em de 20 g de TFSA, onde se colocou 50 mL da solução de hidróxido de sódio $0,20 \text{ mol L}^{-1}$, que após agitação mecânica em copo metálico, fez-se a separação pela peneira ABNT 270, por meio de lavagem com água destilada, o que ficou retido foi colocado em um becker e levado à estufa com uma temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C}$, por um tempo de 24 horas, e depois era pesado para fazer os cálculos da percentagem de areia na amostra (EMPRAPA/SNLCS, 1979).

4.2.4.3 - Argila

A argila foi determinada na suspensão que passou pela peneira ABNT 270 (0,053 mm), depois de ser feita a lavagem das areias (grossa e fina), coletando-se o precipitado em proveta de 1000 mL, para em seguida se fazer uma agitação com bastão de alumínio (com roda de borracha na extremidade) por 2 minutos, deixando em repouso por 2 horas, tempo estabelecido para se fazer as leituras com um densímetro apropriado para essa finalidade (EMPRAPA/SNLCS, 1979).

4.2.4.4 - Porosidade total do solo

A porosidade total do solo (PTS) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\text{PTS} = [(\text{DP} - \text{DS}) \times 100] \times \text{DP}^{-1}, \text{ onde:} \quad (12)$$

DP = Densidade das partículas,

DS = densidade do solo.

4.2.5 - Determinações no solo para obtenção dos atributos químicos

Para análises químicas foram utilizadas as amostras de TFSA, para serem feitas as seguintes determinações:

4.2.5.1 - pH

O pH foi determinado na mistura de 20 mL de TFSA com 50 mL de água destilada, que foi agitada cinco vezes com bastão de vidro e, depois de 30 minutos se fez a leitura em potenciômetro, seguindo metodologia descrita por Vettori (1969).

4.2.5.2 - Fósforo, Potássio e Sódio

O Fósforo (P), o Potássio (K^+) e o Sódio (Na^+) foram determinados no sobrenadante procedente da mistura de 10 mL de TFSA com 100 mL da solução extratora Mellich-1 (0,69 mL de H_2SO_4 + 4,30 mL de HCl para 1 L de água destilada), depois da agitação circular em mesa agitadora de solos, por um tempo de 10 minutos. A mistura foi colocada para decantar, para obtenção do extrato A, que foi coletado 24 horas após a agitação (EMPRAPA/SNLCS, 1979).

Para analisar o Fósforo, retirou-se uma alíquota de 5 mL do extrato A e na presença de 10 mL da solução de molibdato de amônio a 0,60%, tendo como redutor 1 mL da solução de ácido ascórbico a 3%, manteve-se a mistura em repouso por 1 hora, para posteriormente fazer a leitura em colorímetro, usando o filtro vermelho (ORLANDO FILHO, 1983, p. 354).

O K^+ e o Na^+ foram determinados por fotometria de chama, em alíquotas provenientes do extrato A, após calibração do aparelho com as respectivas curvas padrão: 0, 25, 50, 75 e 100 mg dm^{-3} para K^+ e 0, 5, 10, 15 e 20 mg dm^{-3} para Na^+ (EMPRAPA/SNLCS, 1979).

4.2.5.3 - Cálcio + Magnésio

A determinação dos elementos químicos Cálcio + Magnésio ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) foi feita no extrato A, assim preparado: em erlenmeyer de 125 mL colocou-se 10 mL de TFSA e adicionou 100 mL da solução salina de cloreto de potássio (1 mol L^{-1}), depois fez-se uma agitação circular por 10 minutos em mesa agitadora de solos e no dia seguinte coletou-se 25 mL do extrato A para determinação de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (VETTORI, 1969). Depois de se adicionar 2,50 mL do coquetel tampão a pH 7 [50 mL de cianeto de potássio + 300 mL de trietanolamina + 300 mL de solução tampão pH 10 – (solução tampão pH 10 = dissolver 67,50 g de NH_4Cl em 200 ml de água, adicionar 600 ml NH_3 + 0,93 g de EDTA + 0,616 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, completar a 1 litro com água destilada)] e três gotas do indicador eriocromo negro T (100 mg de eriocromo negro T em 25 mL de álcool metílico que contenha 16 g de bórax por litro), para em seguida se fazer a titulação com a solução de EDTA a 0,0125 M (EMPRAPA/SNLCS, 1979).

4.2.5.4 - Hidrogênio + Alumínio

Para determinação dos elementos químicos Hidrogênio + Alumínio ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), colocou-se 10 mL de TFSA em um erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se 75 mL da solução de acetato de cálcio ($0,50 \text{ mol L}^{-1}$ - pH 7,10 – 7,20), agitou-se por 10 minutos em mesa agitadora de solos e no dia seguinte coletou-se 25 mL do extrato sobrenadante (VETTORI, 1969), colocou-se 3 gotas da solução alcoólica de fenolftaleína a 3 % e em seguida fez-se a titulação com NaOH a 0,025 N, até a mudança de incolor para cor róseo (EMPRAPA/SNLCS, 1979).

4.2.5.5 - Carbono total

O carbono total foi determinado na TFSA, depois da amostra ter sido triturada em gral e passada por peneira de ABNT 60, em 0,50 g da amostra foi adicionado 10 mL de dicromato de potássio a $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e levado para uma rápida digestão em placa aquecedora; que depois de ferver por 5 minutos, esperou-se esfriar para adicionar 80 mL de água destilada, 1,50 mL de ácido fosfórico (concentrado) e 3 gotas de difenilamina ácida (3 % em ácido sulfúrico concentrado) como indicador,

para depois titular com sulfato ferroso amoniacal a $0,20 \text{ mol L}^{-1}$ (EMPRAPA/SNLCS, 1979; MENDONÇA; MATOS, 2005; VITTI et al., 2006).

De posse do carbono total, poder-se-á calcular o teor de matéria orgânica total do solo (MOS), mediante a sua multiplicação pelo fator 1,724 para se ter a percentagem de MOS. Este fator é determinado por se admitir que, na composição média do húmus no solo, o carbono participa com 58 % (FONTES; FONTES, 1992; VITTI et al., 2006).

4.2.5.6 - Carbono solúvel em água

Para se fazer esta determinação, tem-se como suporte básico a metodologia descrita por Bartlett; Ross (1988); onde se estima que a quantidade de carbono presente na solução se manifesta através da perda de cor, formada pelo complexo Mn(III)-pirofosfato, quando o Mn(III) torna-se reduzido pela matéria orgânica na presença de ácido sulfúrico.

Para determinação do Carbono solúvel em água (CSA), utilizou-se a TFSA que foi triturada em gral e passada por peneira ABNT 60, pesou-se 10 g de solo que foi colocado em tubo plástico apropriado para centrífuga, adicionou-se 20 mL de água destilada e levou para agitação horizontal (em mesa agitadora) durante 15 minutos (MENDONÇA; MATOS, 2005).

Em seguida foi feita uma centrifugação ($1.500 \text{ g FCR}_{\text{média}}$) e depois uma filtração de 2,50 mL do sobrenadante centrifugado, onde se adicionou 2,50 mL de água deionizada, 2,50 mL da mistura denominada Reagente de Trabalho (8 g de pirofosfato de sódio, 1,26 mL de ácido sulfúrico, 0,03 g permanganato de potássio e 1,35 g de sulfato de manganês) e 2,50 mL de ácido sulfúrico concentrado. Após 18 horas foram feitas as leituras em espectrofotômetro com comprimento de onda de 495 nm (MENDONÇA; MATOS, 2005).

4.2.5.7 - Capacidade de troca de cátions

A Capacidade de troca de cátions (CTC) é calculada por:

$$CTC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + [(H^+ + Al) + Na^+]^3 \quad (13)$$

4.2.5.8 - Saturação de Potássio na CTC

A saturação de Potássio na CTC (% K_{CTC}) é calculada por:

$$\% K_{CTC} = (K^+ \times 100) \times CTC^{-1} \quad (14)$$

4.3 - Planejamento da análise estatística

Os dados foram analisados com base no estudo da análise estatística (ANAVA), utilizando-se o programa de computador SISVAR, para calcular os dados organizados para um modelo fatorial de $2^2 \times 5$ (usinas x vinhaça x camadas), com quatro repetições.

4.3.1 - Distribuição das variáveis

A **Tabela 2** mostra como foi feita a distribuição para as três variáveis: ambiente (usinas), utilização da vinhaça (com e sem) e cinco camadas do solo (até 1 metro de profundidade).

Tabela 2 - Distribuição das variáveis utilizadas no esquema da variação estatística, sendo: ambiente (usinas), condições e camadas.

Ambiente (usinas)	A ₁ – Marituba A ₂ – Santo Antonio
Condições	B ₁ – Área sem vinhaça B ₂ – Área com vinhaça
Camadas	C ₁ – 0 – 10 cm C ₂ – 10 – 20 cm C ₃ – 20 – 40 cm C ₄ – 40 – 70 cm C ₅ – 70 – 100 cm

Fonte: autor, 2013.

³ Os resultados dos atributos $H^+ + Al^{3+}$ e Na^+ estão nos APENDICES B e C, respectivamente

4.3.2 - Distribuição dos tratamentos

Os tratamentos foram organizados conforme mostra a **Tabela 3**, onde apresenta as combinações dos ambientes (A, B e C), os diferentes ambientes (UMA

Tabela 3 - Tratamentos adotados nas duas usinas.

Trat ^{os}	Comb ^{coes}	Ambiente	Condições	Camadas
T ₁	A ₁ B ₁ C ₁	Marituba	sem vinhaça	0-10 cm
T ₂	A ₁ B ₁ C ₂	Marituba	sem vinhaça	10-20 cm
T ₃	A ₁ B ₁ C ₃	Marituba	sem vinhaça	20-40 cm
T ₄	A ₁ B ₁ C ₄	Marituba	sem vinhaça	40-70 cm
T ₅	A ₁ B ₁ C ₅	Marituba	sem vinhaça	70-100 cm
T ₆	A ₁ B ₂ C ₁	Marituba	com vinhaça	0-10 cm
T ₇	A ₁ B ₂ C ₂	Marituba	com vinhaça	10-20 cm
T ₈	A ₁ B ₂ C ₃	Marituba	com vinhaça	20-40 cm
T ₉	A ₁ B ₂ C ₄	Marituba	com vinhaça	40-70 cm
T ₁₀	A ₁ B ₂ C ₅	Marituba	com vinhaça	70-100 cm
T ₁₁	A ₂ B ₁ C ₁	S ^{to} Antonio	sem vinhaça	0-10 cm
T ₁₂	A ₂ B ₁ C ₂	S ^{to} Antonio	sem vinhaça	10-20 cm
T ₁₃	A ₂ B ₁ C ₃	S ^{to} Antonio	sem vinhaça	20-40 cm
T ₁₄	A ₂ B ₁ C ₄	S ^{to} Antonio	sem vinhaça	40-70 cm
T ₁₅	A ₂ B ₁ C ₅	S ^{to} Antonio	sem vinhaça	70-100 cm
T ₁₆	A ₂ B ₂ C ₁	S ^{to} Antonio	com vinhaça	0-10 cm
T ₁₇	A ₂ B ₂ C ₂	S ^{to} Antonio	com vinhaça	10-20 cm
T ₁₈	A ₂ B ₂ C ₃	S ^{to} Antonio	com vinhaça	20-40 cm
T ₁₉	A ₂ B ₂ C ₄	S ^{to} Antonio	com vinhaça	40-70 cm
T ₂₀	A ₂ B ₂ C ₅	S ^{to} Antonio	com vinhaça	70-100 cm

Fonte: autor, 2013.

e USA), as situações do uso da vinhaça (com e sem) e as diferentes camadas do solo (**Tabela 3**).

4.3.3 – Análise de variância

O experimento fatorial é aquele que inclui todas as combinações de vários conjuntos de tratamentos e fatores, por isso é mais eficiente do que os experimentos simples com um só conjunto de tratamentos e permite tirar conclusões mais gerais e consistentes (GOMES, 1978).

Tabela 4 - Esquema da análise de variância.

Causas da variação	GL
Ambiente (Am)	1
Condições (Co)	1
Camadas (Ca)	4
Regressão do 1º grau	1
Regressão do 2º grau	1
Regressão do 3º grau	1
Interação Am x Co	1
Interação Am x Ca	4
Interação Co x Ca	4
Interação Am x Co x Ca	4
Tratamentos	19
Resíduo	60
TOTAL	79

Fonte: autor, 2013.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Atributos físicos do solo nas UMA e USA

Os resultados da análise de variância dos atributos físicos dos solos coletados nas usinas Marituba (UMA) e S^{to} Antonio (USA) estão apresentados na **Tabela 5**. Observa-se que de acordo com o teste F, aplicado para nível de 0,01 de probabilidade, para a fonte de variação usinas houve diferença significativa para todas as variáveis (densidade do solo, areia, argila e porosidade total do solo).

Para a fonte de variação vinhaça apenas a porosidade total do solo (PTS) apresentou diferença significativa a 0,01 de probabilidade pelo teste F, enquanto a densidade do solo (DS) e argila apresentaram diferenças significativas a 0,05 de probabilidade pelo referido teste e apenas a variável areia não apresentou diferença significativa (**Tabela 5**).

Ao se referir as diferentes camadas do solo, apenas a DS não apresentou significância, porém as demais variáveis (areia, argila e PTS) foram significativas a 0,01 de probabilidade (**Tabela 5**).

Na interação entre usinas x vinhaça houve diferença significativa pelo teste F a 0,01 de probabilidade para variáveis área e argila, no entanto não houve diferença significativa a 0,05 de probabilidade para as variáveis DS e PTS (**Tabela 5**).

A interação entre usinas x camadas mostrou que houve diferença significativa pelo teste F ao nível de 0,01 para as variáveis DS e areia. Também houve diferença significativa ao nível de 0,05 para PTS e não houve diferença para argila (**Tabela 5**).

Para interação entre vinhaça x camadas houve diferença significativa pelo teste F a 0,05 de probabilidade apenas para a variável DS, já que as demais variáveis (areia, argila e PTS) foram NS (**Tabela 5**).

Para interação entre usinas x vinhaça x camadas houve diferença significativa pelo teste F ao nível de 0,01 de probabilidade apenas para a variável areia. Já as variáveis DS, argila e PTS não apresentaram diferença estatística (**Tabela 5**).

Tabela 5 - Análise de variância dos atributos físicos de solos coletadas em cinco camadas nas UMA e USA, em áreas com e sem vinhaça.

C. Variação	GL	D. do solo	Areias	Argila	Porosidade
Ambiente	1	**	**	**	**
Condições	1	*	NS	*	**
Camadas	4	NS	**	**	**
R. Linear	1	NS	**	**	NS
R. Quadrática	1	NS	**	**	**
R. Cúbica	1	NS	*	NS	*
Int. Am x Co	1	NS	**	**	NS
Int. Am x Ca	4	**	**	NS	*
Int. Co x Ca	4	*	NS	NS	NS
Int. Am x Co x Ca	4	NS	**	NS	NS
CV (%)		17,79	4,02	10,95	6,75

Fonte: autor, 2013. * - significativo a 5%. ** - significativo a 1%. NS - não significativo.

5.1.1 - Mudanças causadas pela vinhaça na densidade do solo na UMA

A **Tabela 6** mostra os resultados das análises da DS nas áreas com e sem vinhaça na UMA; como se pode observar, praticamente todos os tratamentos apresentaram os teores de DS muito próximos, excetuando apenas o tratamento T₄. Avaliando-se os atributos referentes à DS da área com vinhaça é possível afirmar que se trata de um solo com acentuado grau de compactação (PEDROTTI; MELLO JÚNIOR, 2009a), conforme se pode ver nas segunda e terceira camadas do solo (10-20 e, 20-40 cm).

Diante dos resultados analíticos obtidos no solo que recebeu vinhaça, foi possível se constatar que os valores da DS foram superiores aos da área que não recebeu vinhaça (**Tabela 6**), sendo que este mecanismo está ligado à ação antrópica, que é originário do manejo de máquinas agrícolas na área (VASCONCELOS et al., 2012), conhecido no meio popular agrônomo como “pé de grade” e tem causado alguns transtornos para serem solucionados pelos agricultores, os quais buscam a utilização da subsolagem como alternativa mais viável, já que a vinhaça não é a causadora e nem tampouco uma alternativa para amenizar o problema, pois sua contribuição referente às propriedades físicas do solo é de pouca importância, sendo que esses índices são considerados por Pedrotti; Mélo Júnior (2009a) como indicativos de solo com acentuado grau de compactação (KLEIN; LIBARDI, 2002; REICHARDT; TIMM, 2004).

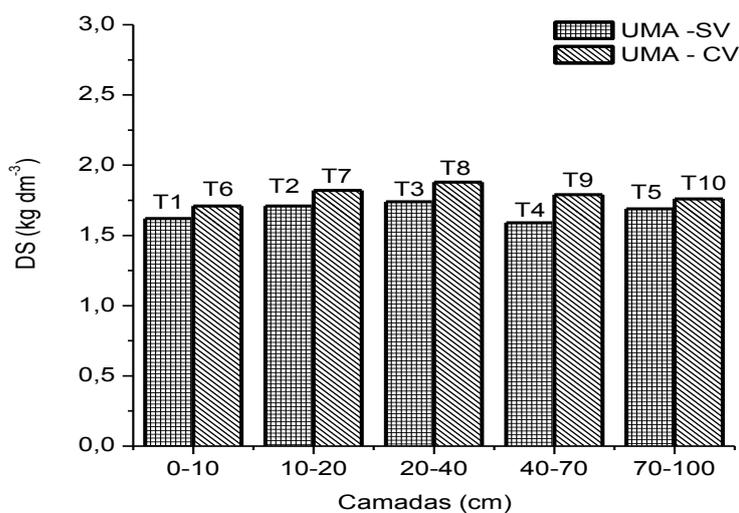
Tabela 6 - Resultados da densidade do solo (kg dm^{-3}) das amostras obtidas nas UMA e USA, até a profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
DS (kg dm^{-3})	UMA-SV	1,62 ^{a(1)}	1,71 ^a	1,74 ^a	1,64 ^a	1,69 ^a
	UMA-CV	1,71 ^a	1,82 ^a	1,88 ^a	1,79 ^b	1,76 ^a
	USA-SV	1,45 ^a	1,43 ^a	1,47 ^a	1,41 ^a	1,36 ^a
	USA-CV	1,46 ^a	1,41 ^a	1,56 ^a	1,55 ^a	1,47 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Observando-se o efeito da vinhaça nas diferentes camadas do solo, tem-se, entre os tratamentos, as seguintes diferenças percentuais: T₆ e T₇ de 6,43 %, entre T₇ e T₈, de 3,30 %, indicando que aumentava a compactação na camada, enquanto entre os tratamentos T₉ e T₈, a diferença foi de 4,74 % e por fim de 1,70 % entre T₁₀ e T₉, (**Tabela 6**) indicando que a camada, apesar de ter constatado uma diminuição na compactação, ainda está na faixa classificada como um solo compacto, considerado por Klein; Libardi (2002) e Reichardt; Timm (2004) como indicativos de solo com acentuado grau de compactação.

Figura 7 - Teores da densidade do solo (kg dm^{-3}) obtidos na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Verifica-se, ainda, pela **Figura 7** que os tratamentos da área que não recebeu vinhaça mostraram a sequência de dados, em direção à última camada, com distribuição similar à área que recebeu vinhaça, que apresentou todos os valores em uma faixa que também é considerada como compactada.

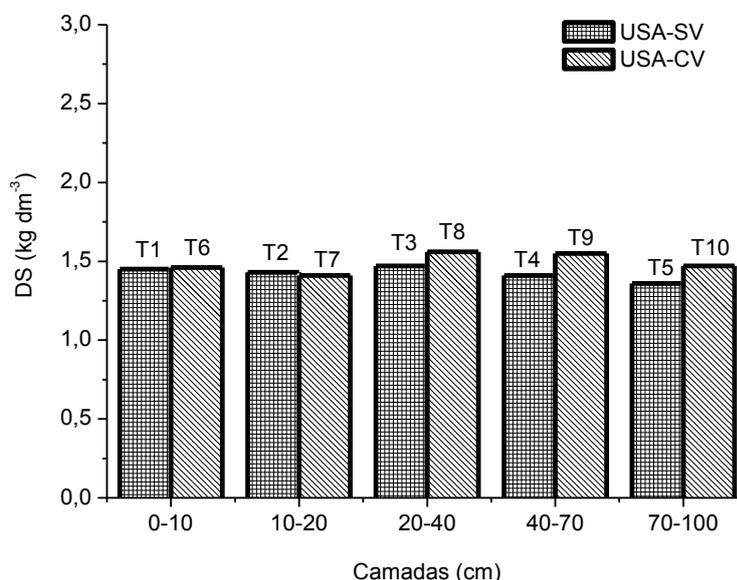
5.1.2 - Mudanças causadas pela vinhaça na densidade do solo na USA

Os resultados das análises dos solos da área que recebeu vinhaça estão representados na **Tabela 6** e na **Figura 8**, os quais mostram que não houve grandes variações da DS, ao longo do perfil do solo, quando foram comparadas as médias dos tratamentos, que variaram de 1,36 a 1,56 kg dm⁻³. Esse comportamento também foi observado por Camilotti et al. (2006).

Mesmo constatando-se que não houve diferença estatística entre os tratamentos, deve-se chamar atenção para o caso do tratamento T₁₈, que apresentou o maior valor modular dentre os demais, permitindo afirmar que é justamente nesta profundidade (20-40 cm) onde ocorre o fenômeno já explicado no item 5.1.1, chamado de “pé de grade”, proveniente do tráfego de máquinas sobre o solo, pois o manejo provoca alterações em sua estrutura, resultando na sua compactação mediante as alterações na DS e a na PTS (OLIVEIRA et al., 2003), concordando com Paulino et al. (2010) quando afirmam que esse manejo pode causar mudanças nas propriedades do solo e, conseqüentemente, influenciar na sua compactação, apresentando a maior densidade na profundidade de 15-30 cm, indicando maior resistência à penetração (KLEIN; LIBARDI, 2002).

Isto reforça a explicação dada para o fenômeno da compactação antropogênica, que ocorre com frequência no epipedon do horizonte A antrópico submetido ao trabalho mecanizado, formando, em seguida, o adensamento originário do “pé de grade” (PACHECO; CANTALICE, 2011).

Figura 8 - Teores da densidade do solo (kg dm^{-3}) obtidos na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

5.1.3 - Interações entre as variáveis ligadas à densidade do solo nas UMA e USA

Quando se aplicou o teste F a $p \leq 0,05$ aos dados da DS (**Tabela 7**), observou-se que não houve diferenças significativas entre as camadas do solo, para ambas as situações (com e sem vinhaça), isto porque a DS sofreu influência marcante da PTS e da MOS, conforme se pode notar pelas **Tabelas 12 e 23**, onde estes atributos se apresentam com médias abaixo daquelas dos tratamentos comparativos (sem vinhaça).

A análise estatística (**Tabelas 5**) correspondente às variáveis estudadas mostra que o ambiente (UMA e USA) apresentou significância ao nível de 0,01 de probabilidade, e o efeito da vinhaça foi significativo ao nível de 0,05 de probabilidade, ambos verificados pelo teste F, enquanto a variável relacionada às camadas do solo não apresentou significância.

Tabela 7 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) da densidade do solo (kg dm^{-3}) nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	1,97 ^b	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	1,35 ^a	1,75 ^a	1,50 ^a	1,75 ^a	1,38 ^a	1,50 ^a
SV	1,58 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	1,75 ^b	1,75 ^a	1,50 ^a	1,88 ^a	2,00 ^b	1,63 ^a
Camadas		1,70	1,69	1,67	1,64	1,64
UMA-SV	1,95 ^b	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	1,20 ^a	2,00 ^b	2,00 ^b	2,00 ^b	1,88 ^b	2,00 ^b
UMA-CV	2,00 ^b	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	1,50 ^a	1,50 ^a	1,00 ^a	1,63 ^a	1,50 ^a	1,13 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p < 0,05$.

A variável ambiente mostrou diferença estatística (Tukey $p < 0,05\%$) entre as médias da UMA ($1,98 \text{ kg dm}^{-3}$) e da USA ($1,35 \text{ kg dm}^{-3}$), sendo aquela superior em 46,30 % (**Tabela 7**), talvez em virtude da topografia plana na região (ver item 4.1), que contribuiu para ter um maior número de operações com máquinas agrícolas sobre a área.

Para o efeito da variável vinhaça, ao aplicar o teste de Tukey a 0,05 de probabilidade, destaca-se a importância da vinhaça com média de $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$, que excede em 17,50 % à média de 1,58 % da testemunha (**Tabela 7**). Isto quer dizer que onde foi usada a vinhaça, a aplicação contribuiu para diminuir a compactação e aumentar a aeração do solo.

A **Tabela 7** mostra que a interação das variáveis ambiente e a influência da vinhaça contribuiu na UMA para apresentar maior média ($2,00 \text{ kg dm}^{-3}$) com 33,33 % acima da USA (1,50 %), sendo esta diferença alcançada em virtude das características físicas do solo serem favorecidas pelo tráfego menor de máquinas, por área apresentar uma topografia inclinada e desfavorável a essa prática.

Para interação entre as variáveis ambiente e camadas do solo, observou-se, pela **Tabela 7**, diferenças significativas, pelo teste de Tukey ao nível de $p < 0,05$, ficando a UMA com índices superiores em todas as camadas do solo em: 33,33, 100,00, 23,08, 25,00 e 77,78 % sobre as médias da USA, reforçando ainda mais a afirmação do efeito da compactação sobre o solo estar relacionada com o movimento de máquinas na unidade que apresenta topografia favorável a esta prática. Apesar de ter apresentado um $CV(\%) = 17,79$, considerado como valor médio, porém é justificável porque foi um atributo obtido no campo.

5.1.4 - Mudanças causadas pela vinhaça em areia do solo na UMA

Tabela 8 - Resultados de areia (dag kg^{-1}) das amostras coletadas nas UMA e USA, até a profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.

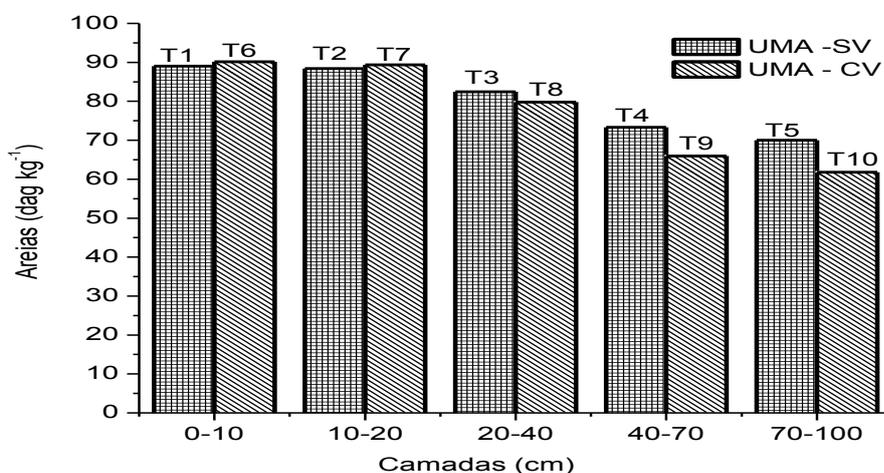
Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
Areia (dag kg^{-1})	UMA-SV	89,03 ^{a(1)}	88,43 ^a	82,46 ^a	73,34 ^a	70,01 ^a
	UMA-CV	90,17 ^a	89,38 ^a	79,80 ^a	65,97 ^b	61,78 ^b
	USA-SV	66,72 ^a	57,57 ^a	52,39 ^a	47,45 ^a	46,51 ^a
	USA-CV	64,17 ^a	62,67 ^a	61,40 ^b	55,27 ^b	52,58 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Considerando o efeito da vinhaça interagindo com as camadas do solo, observou-se que ela interferiu apenas na penúltima delas (na profundidade de 40-70 cm). Acredita-se que esta condição não esteja ligada ao efeito do tratamento e sim a uma possível variabilidade geológica intrínseca, influenciando na estrutura do solo, pois, fenômeno semelhante foi encontrado por Oliveira et al. (2013).

A **Tabela 8** apresenta os teores de areia dos solos da UMA; parâmetros estes que além de fazerem parte da composição granulométrica (areia, silte e argila) são os componentes que, apesar de não serem modificados pelos tratamentos, proporcionaram alterações em outros atributos presentes no solo.

Figura 9 - Teores de areia dos solos (dag kg^{-1}) coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

A **Figura 9** mostra que a utilização da vinhaça praticamente não proporcionou influência nos teores das partículas de areia presentes no solo, porém, o que se pode esperar é que a arrumação estrutural dessas partículas ocasionou alterações em outros atributos no solo.

A areia (grossa e fina) - que por sua própria constituição natural não é fácil de sofrer alterações físicas em pouco espaço de tempo, principalmente promovida pela utilização da vinhaça - poderá apresentar pequenas alterações nos mecanismos de sorção e adsorção de íons presentes na solução do solo que recebeu vinhaça.

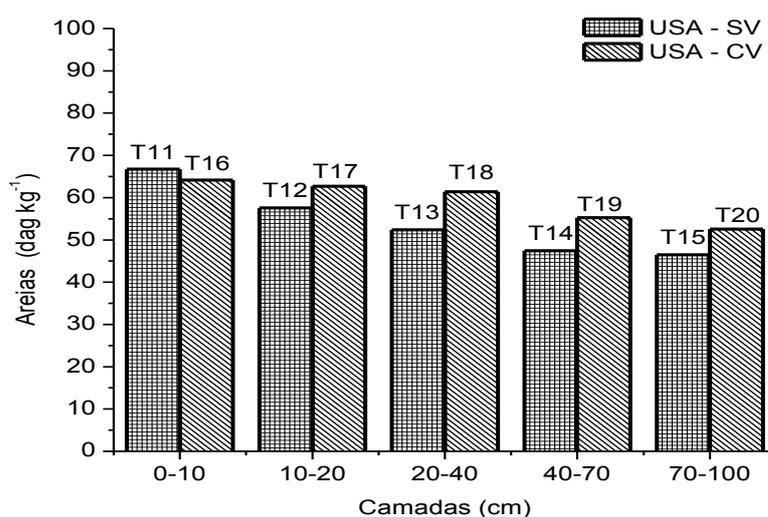
Fazendo-se a comparação entre as camadas do solo onde se aplicou a vinhaça, poder-se-á ver que as duas primeiras camadas apresentaram teores muito próximos, caindo bruscamente quando foram avaliadas as três camadas seguintes (**Figura 9**), que foram respectivamente reduzidas em 12,07 %, 20,96 % e finalmente por 6,78 % da quarta para última camada. Como praticamente não houve diferenças dos valores entre as áreas, principalmente nas três primeiras camadas, isto só vem reforçar a afirmação de que a vinhaça não interfere nos teores de areia do solo (PAULINO et al., 2010).

5.1.5 - Mudanças causadas pela vinhaça em areia do solo na USA

A **Tabela 8** revela que a aplicação de vinhaça no solo não ocasionou mudanças estruturantes nos teores de areia, essa confirmação pode ser feita pela diferenciação entre as áreas com e sem vinhaça, constatando-se que a diferença percentual entre as médias dos tratamentos T₁₈ com T₁₃, T₁₉ com T₁₄ e T₂₀ com T₁₅ foram, respectivamente, 17,20, 16,48 e 13,32 %. Estes valores foram bem mais altos do que 3,97 e 8,86 % encontrados para as camadas superficiais (T₁₆ com T₁₁) e subsuperficiais (T₁₇ com T₁₂) do solo, comportamento similar que também foi encontrado por Camilotti et al. 2006 (**Figura 10**).

O motivo desta variação poderá estar, possivelmente, relacionada com a diminuição nos teores de argila total do solo que recebeu vinhaça, o que provocou a dispersão da argila no perfil do solo, precipitando este colóide para formar pequenos grumos ou agregados que irão se aderir às partículas de areia, formando uma película fina em forma de um filme nas suas superfícies específicas.

Figura 10 - Teor de areia (dag kg⁻¹) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Como a vinhaça não altera as propriedades físicas do solo, nem tampouco modifica a granulometria das partículas minerais (areia, silte e argila) que originam a

fração textural do mesmo, algumas diferenças que aparecem nas análises de laboratório poderão ser atribuídas à variabilidade espacial inerente a uma mesma área, em função da heterogeneidade que é própria dos solos agricultáveis.

5.1.6 - Interações entre as variáveis ligadas à areia do solo nas UMA e USA

A **Tabela 5** apresenta os valores alusivos às fontes de variação ambiental (UMA e USA) e camadas do solo, onde se observa diferenças significativas para ambas, quando se aplicou o teste F a 0,01 % de probabilidade. Porém, para a fonte de variação vinhaça não houve diferença significativa.

Quando foi avaliada a variação ambiental (**Tabela 9**), verificou-se que houve diferença significativa entre as médias (UMA = 79,06 e USA = 56,68 dag kg⁻¹), quando se aplicou o teste de Tukey a $p \leq 0,05$, sendo que a UMA foi superior em 39,48 %, podendo-se atribuir esta superioridade aos seus teores mais baixos de argila (**Tabela 10**) e MOS (**Tabela 23**).

Tabela 9 - Análise fatorial (2²x5) de areia (dag kg⁻¹) nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	79,05 ^{b(1)}	Interação (SV vs. Camadas)				
USA	56,68 ^a	78,00 ^a	72,88 ^a	67,38 ^a	60,38 ^a	58,38 ^a
SV	67,40 ^a	Interação (CV vs. Camadas)				
CV	68,33 ^a	77,25 ^a	76,00 ^b	70,75 ^b	60,50 ^a	57,13 ^a
Camadas		78,28	73,89	68,26	61,43	57,45
UMA-SV	80,70 ^b	Interação (UMA vs. Camadas)				
USA-SV	54,10 ^a	89,75 ^b	88,75 ^b	81,25 ^b	69,50 ^b	66,00 ^b
UMA-CV	77,40 ^b	Interação (USA vs. Camadas)				
USA-CV	59,25 ^a	65,50 ^a	60,13 ^a	56,88 ^a	51,38 ^a	49,50 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Quando foi avaliada a variação ambiental (**Tabela 9**), verificou-se que houve diferença significativa entre as médias (UMA = 79,06 e USA = 56,68 dag kg⁻¹),

quando se aplicou o teste de Tukey a $p \leq 0,05$, sendo que a UMA foi superior em 39,48 %, podendo-se atribuir esta superioridade aos seus teores mais baixos de argila (**Tabela 10**) e MOS (**Tabela 23**).

Referindo-se ao efeito da influência da distribuição das camadas no perfil do solo, foi importante mostrar uma pequena redução dos atributos ao aumentar a profundidade das camadas no solo, de tal modo que o modelo matemático da equação $Y = 80,672 - 0,491X + 0,00256X^2$ pode explicar 99,83 % do fenômeno proposto, quando se aplicou o teste F a 0,01 de probabilidade (**Tabela 5**). Ao aplicar a equação se observou que os teores de areia diminuía de cima para baixo, o que é normal para o tipo de solo estudado (Argissolo). Vale salientar que a presença da vinhaça não influenciou na modificação desse atributo.

Referindo-se à interação entre as variáveis vinhaça e usinas (**Tabela 9**) se constatou que houve diferença significativa, pelo teste de Tukey a 0,01 de probabilidade, favorável a UMA (77,40 dag kg⁻¹) que apresentou superioridade de 30,63 % sobre a USA (59,25 dag kg⁻¹).

Para interação entre as variáveis ambiente e camadas do solo se observou diferença significativa, com a UMA apresentando suas médias superiores (89,75, 88,75, 81,25, 69,50 e 66,00 dag kg⁻¹) as da USA (65,50, 60,13, 56,88, 51,38 e 49,50 dag kg⁻¹) com as diferenças percentuais de 37,02, 47,60, 42,90 35,27 e 33,33 %. Estes aumentos foram atribuídos ao caráter arenoso mais acentuado apresentado pela UMA (**Tabela 9**).

O efeito da vinhaça ao interagir com as camadas do solo mostrou superioridade apenas na segunda (10-20 cm) e na terceira (20-40 cm) camadas, com média de 76,00 e 70,75 dag kg⁻¹ da área com vinhaça contra 72,88 e 67,38 dag kg⁻¹ da área sem vinhaça, sendo não significativas as demais camadas do solo. Estas diferenças podem ser atribuídas à heterogeneidade do solo e não ao efeito da vinhaça, basta verificar as diferenças percentuais calculadas nas duas camadas que foram muito baixas, sendo, 4,28 % para camada de 10-20 cm e 5,00 % para camada de 20-40 cm.

O comportamento de todos os tratamentos (T₁ até T₁₀) mostra que há uma grande semelhança entre as duas áreas (**Figura 11**), pois aumentaram de valores quando vão alcançando as camadas mais profundas no perfil do solo. Os tratamentos T₁, T₂, T₆ e T₇, apresentaram valores baixos e muito próximos entre si, assim como T₃ e T₈, apresentaram teores bem próximos, porém acima dos quatro tratamentos anteriores e abaixo dos tratamentos seguintes (T₄, T₅, T₉ e T₁₀), que apresentaram valores bem próximos entre si, demonstrando que este comportamento diz respeito à arrumação das partículas (estrutura) e que isso ocorre naturalmente no solo, e não em função do uso da vinhaça.

No que se refere aos resultados obtidos no campo e nas análises conduzidas no laboratório, percebe-se, pelo valor muito baixo apresentado pelo CV (%) = 4,02, que houve uma precisão muito grande em relação aos resultados apresentados pelo atributo.

5.1.7 - Mudanças causadas pela vinhaça em argila do solo na UMA

O comportamento de todos os tratamentos (T₁ até T₁₀) mostra que há uma grande semelhança entre as duas áreas (**Tabela 10 e Figura 11**), por aumentarem os valores quando vão alcançando as camadas mais profundas no perfil do solo.

Tabela 10 - Teores de argila (dag kg⁻¹) dos solos nas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
Argila (dag kg ⁻¹)	UMA-SV	8,77 ^{a(1)}	9,94 ^a	14,69 ^a	22,94 ^a	23,47 ^a
	UMA-CV	7,94 ^a	8,94 ^a	15,32 ^a	25,12 ^a	27,54 ^a
	USA-SV	26,94 ^a	30,89 ^a	37,77 ^a	41,73 ^a	46,23 ^a
	USA-CV	24,44 ^a	28,44 ^a	32,32 ^a	37,01 ^a	43,61 ^a

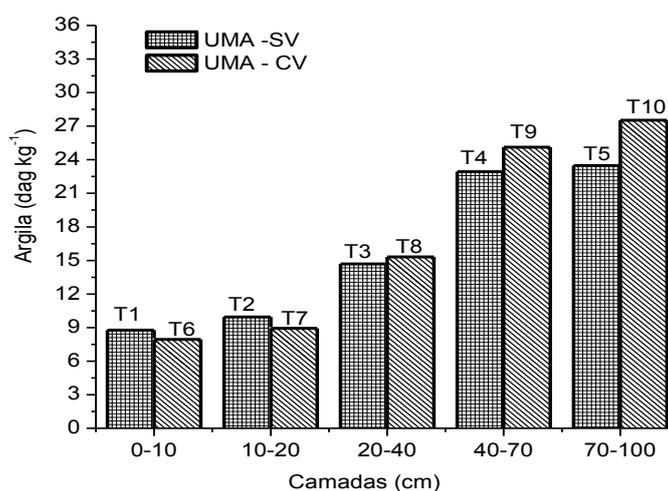
Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a p < 0,05. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Os tratamentos T₁, T₂, T₆ e T₇, apresentaram valores baixos e muito próximos entre si, assim como T₃ e T₈, apresentaram teores bem próximos, porém acima dos quatro tratamentos anteriores e abaixo dos tratamentos seguintes (T₄, T₅, T₉ e T₁₀), que, por sua vez, apresentaram valores bem próximos entre si, demonstrando que

este comportamento diz respeito à arrumação das partículas (estrutura) e que isso ocorre naturalmente no solo, e não em função do uso da vinhaça.

A **Tabela 10** mostra, na área que recebeu vinhaça, que os tratamentos das duas primeiras camadas (T_6 e T_7) apresentaram valores de argila muito baixos, essa característica é própria dos Argissolos (PRADO et al., 2008), conseqüentemente nessas camadas os teores de areia foram muito altos, caracterizando-os como originários de camadas arenosas, com elevada tendência à lixiviação de nutrientes no solo.

Figura 11 - Teores de argila dos solos (dag kg^{-1}) coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013,

5.1.8 - Mudanças causadas pela vinhaça em argila do solo na USA

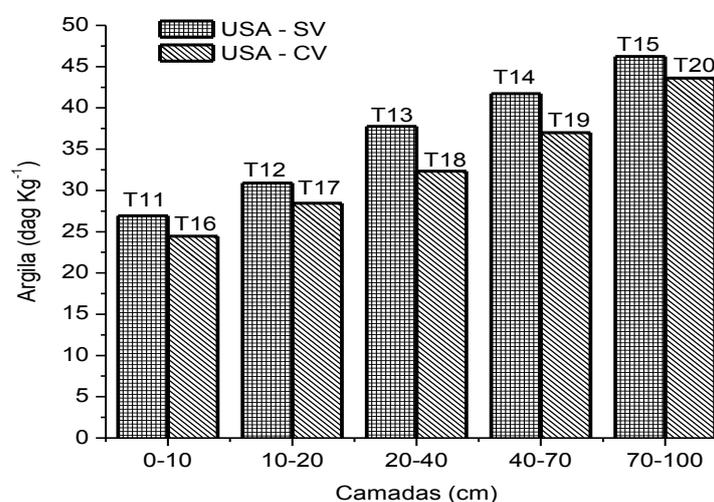
Os resultados das análises referentes à argila, na área que recebeu vinhaça, na USA estão listados na **Tabela 10**, onde há, entre os tratamentos, um gradiente crescente e positivo no sentido descendente do perfil do solo, ou seja, o teor de argila aumentou quando foi aumentando a profundidade do solo.

Conforme se pode observar pela **Figura 12**, os dados plotados se distribuem praticamente como se fosse uma reta com coeficiente linear positivo (para ambas as áreas); porém, é oportuno salientar que esses resultados não estão relacionados

com o efeito da vinhaça aplicada no solo, e sim, ligados à própria formação geomorfológica do solo, que ocorre mediante o processo de intemperização das frações granulométricas do solo (CAMILOTTI et al., 2006).

Vale salientar que a área não tratada com vinhaça apresentou, em todas as médias dos seus tratamentos (T₁₁ até T₁₅), valores maiores do que as médias dos tratamentos da área que recebeu vinhaça (T₁₆ a T₂₀), com percentuais de redução iguais a 10,23; 8,61; 16,86; 12,75 e 6,01 %, indicando que esta diferença está ligada a formação geomorfológica do solo, que, segundo Nielsen et al. (1972), *apud* Paulino et al. (2011), poderá contribuir com o rearranjo das partículas do solo, promovendo o deslocamento da fração argila para as camadas subsuperficiais, em solos cuja argila está disposta num maior grau de dispersão, imigrando facilmente sob condições de chuva ou irrigação.

Figura 12 - Teores de argila dos solos (dag kg⁻¹) coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

5.1.9 - Interações entre as variáveis ligadas à argila do solo nas UMA e USA

Observando-se as **Tabelas 5 e 11** é possível se notar que houve efeito significativo, pelo teste F com $p \leq 0,01$, para as variáveis ambiente e camadas do

solo, enquanto para a variação de vinhaça, a sensibilidade foi de $p \leq 0,05$ pelo mesmo teste.

A variável ambiente (UMA= 16,25 e USA= 34,68 dag kg⁻¹) apresentou destaque para USA, com uma média de 113,38 % acima da UMA, confirmando que o solo apresentou características argilosas bem acima desta unidade (**Tabela 11**), em todas as profundidades.

Tabela 11 - Análise fatorial (2²x5) de argila (dag kg⁻¹) nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	0-70	70-100
UMA	16,25 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	34,68 ^b	17,50 ^a	20,00 ^a	26,00 ^a	32,13 ^a	34,88 ^a
SV	26,10 ^b	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	24,83 ^a	15,75 ^a	18,25 ^a	23,50 ^a	31,13 ^a	35,50 ^a
Camadas		16,05	19,88	24,87	31,16	35,35
UMA-SV	15,75 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	36,45 ^b	8,00 ^a	9,00 ^a	4,75 ^a	24,00 ^a	25,50 ^a
UMA-CV	16,75 ^a	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	32,90 ^b	25,25 ^b	29,25 ^b	34,75 ^b	39,25 ^b	44,88 ^b

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Para fonte de variação ligada ao efeito da presença da vinhaça no solo (**Tabela 5**), a resposta estatística foi significativa ao nível de $p \leq 0,05$, quando foi aplicado o teste F. Para comparação entre as variáveis com e sem vinhaça, constatou-se que o efeito da vinhaça (24,83 dag kg⁻¹) foi inferior ao tratamento convencional (sem vinhaça = 26,11 dag kg⁻¹).

Já para a questão relacionada com as camadas no perfil do solo, observou-se, pelo teste F, que houve resposta estatística a $p \leq 0,01\%$ (**Tabela 11**), podendo ser representada pela equação $Y = 13,982 + 0,424X - 0,00203X^2$, com um $R^2 = 0,9954$, coeficiente este que explica 99,54 % dos casos por meio do modelo proposto, indicando que os teores de argila aumentaram no sentido de cima para baixo, o que

é comum para o tipo de solo estudado (Argissolo), é oportuno salientar que a presença da vinhaça não influenciou na modificação desse atributo.

A interação entre ambiente com a presença da vinhaça foi significativa a $p \leq 0,01$ pelo teste de Tukey, com a USA apresentando a sua média igual a 32,90 dag kg^{-1} , sendo superior a UMA (16,75 dag kg^{-1}) em 96,42 % (**Tabela 11**), enquanto a interação de vinhaça com as camadas do solo não apresentaram significância entre os tratamentos (**Tabela 5**).

Por outro lado, a interação entre ambiente e as camadas no perfil do solo foi significativa a $p \leq 0,01$, influenciada pelo efeito ambiental que apresentou alto índice de superioridade (113,38 %), mostrando que as diferenças para todas as camadas foram, respectivamente, 215,62, 225,33, 135,59, 63,54 e 75,98 %, sendo maiores para USA, indicando que suas áreas apresentaram elevados teores de argila sobre os da UMA, em todas as camadas do solo.

Por se tratar de resultados obtidos diretamente no campo, vê-se que o valor apresentado pelo CV (%) = 10,95 demonstra que houve uma precisão grande para atributos avaliados.

5.1.10 - Mudanças causadas pela vinhaça na porosidade total do solo na UMA

Tabela 12 - Resultados da porosidade total do solo (%) nas UMA e USA, proveniente de amostras coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
PTS (%)	UMA-SV	39,06 ^{a(1)}	35,66 ^a	34,43 ^a	37,50 ^a	36,13 ^a
	UMA-CV	35,57 ^a	31,41 ^a	29,15 ^b	32,36 ^b	33,49 ^a
	USA-SV	45,19 ^a	46,23 ^a	44,72 ^a	46,00 ^a	48,68 ^a
	USA-CV	45,91 ^a	46,98 ^a	41,13 ^a	41,51 ^a	44,63 ^a

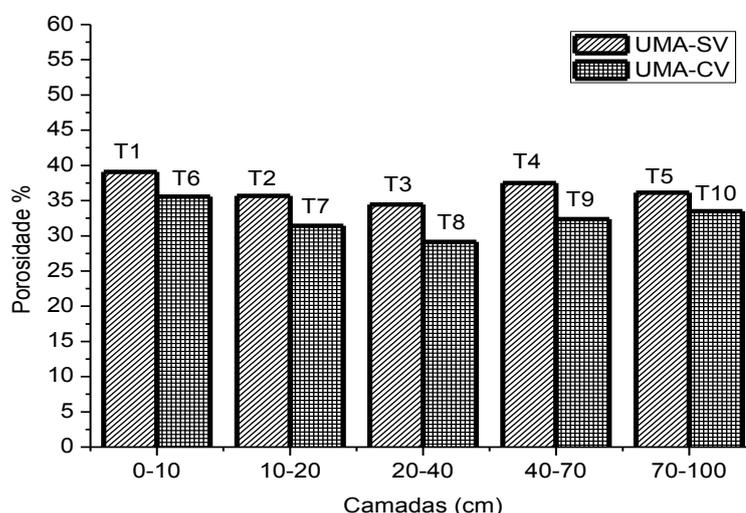
Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Na área que recebeu vinhaça, à medida que aumentava a profundidade os teores da porosidade total do solo (PTS) decresceram entre os três primeiros

tratamentos (T_6 , T_7 e T_8) e aumentaram nas duas camadas seguintes, mas sempre apresentando valores inferiores à camada superficial (T_6). De modo que estes índices foram influenciados diretamente pela DS (**Figura 7**), quando esta aumentava a PTS diminuía.

Nota-se, pelo que apresenta a **Tabela 12**, para situação prevista na área onde aplicou a recebeu vinhaça que o tratamento T_6 (35,57 %) foi superior a todos os demais tratamentos das respectivas camadas, os quais, por sua vez, mostraram uma semelhança ao comportamento dos tratamentos da testemunha, que apresentaram a mesma tendência nas quatro camadas (T_1 a T_4) do perfil do solo, divergindo apenas na última camada (T_5), porém com todos os valores um pouco acima dos valores correspondentes aos tratamentos da área que recebeu vinhaça (**Figura 13**), concordando com Vasconcelos et al. (2012) que encontraram valores maiores da PTS sem vinhaça.

Figura 13 - Teores da porosidade total do solo (%) coletado na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



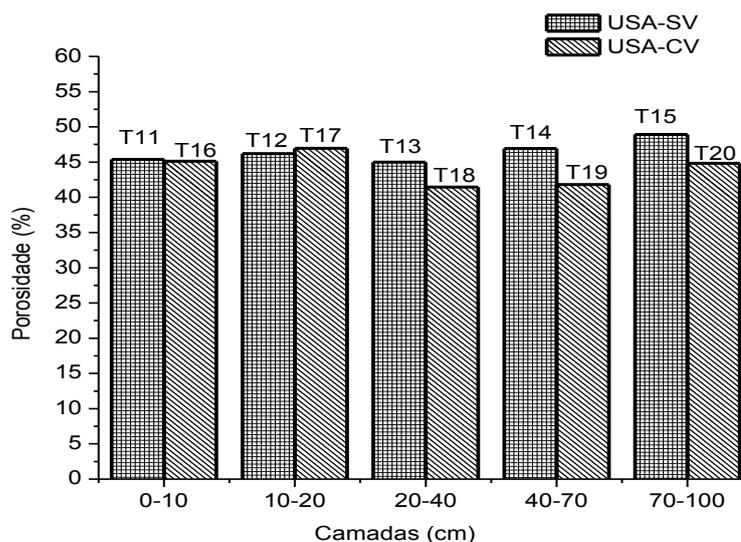
Fonte: autor, 2013.

5.1.11 - Mudanças causadas pela vinhaça na porosidade total do solo na USA

Observando-se a **Figura 14** é possível notar que a PTS variou muito pouco entre os tratamentos da área que recebeu vinhaça; de tal modo que praticamente

não houve expressivas variações entre os tratamentos. Segundo Paulino et al. (2011), as mudanças promovidas pela aplicação de vinhaça nas propriedades do solo podem influenciar na diminuição do tamanho dos poros, mas não nos seus percentuais (KLEIN; LIBARDI, 2002).

Figura 14 - Teores da porosidade total do solo (%) coletado na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

A vinhaça não interferiu na modificação da PTS, isto por este atributo depender do comportamento da DS (**Tabela 6**), pois há inversamente proporcionalidade entre ambas, isto fica bem caracterizado por não poder atribuir à vinhaça qualquer alteração na PTS, sendo mais cauteloso dizer que este comportamento está mais voltado ao reflexo do manejo imposto pelo movimento das máquinas sobre o solo, concordando com Pedrotti et al. (2009-a), quando dizem que o uso de implementos a quebra da estrutura do solo e reduz a PTS, favorecendo o encrostamento e o aparecimento de superfícies susceptíveis à erosão.

5.1.12 - Interações entre as variáveis ligadas à porosidade total do solo nas UMA e USA

A análise estatística (**Tabela 5 e 13**) mostra que houve significância a $p \leq 0,01$ quando se aplicou o teste F, para todas as variáveis, sendo que para o efeito ambiente, a USA teve média de 45,10 %, contra 34,73 % da UMA. Entre elas, a

primeira apresentou superioridade de 29,86 %, atribuindo-se esta condição aos teores de argila presentes no solo.

Tabela 13 - Análise fatorial (2²x5) da porosidade total do solo (%) nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	34,73 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	45,10 ^b	42,13 ^a	41,13 ^a	39,63 ^b	43,25 ^b	42,38 ^b
SV	41,70 ^b	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	38,13 ^a	40,38 ^a	39,25 ^a	35,13 ^a	36,88 ^a	39,00 ^a
Camadas		39,84	39,86	39,89	39,95	40,01
UMA-SV	37,10 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	46,30 ^b	37,38 ^a	33,50 ^a	31,75 ^a	36,13 ^a	34,88 ^a
UMA-CV	32,35 ^a	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	43,90 ^b	45,13 ^b	46,88 ^b	43,00 ^b	44,00 ^b	46,50 ^b

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Quando se fez a comparação referente ao uso da vinhaça, constatou-se que a PTS apresentou média de 41,70 % na área sem vinhaça e 38,12 % quando foi tratada com vinhaça, mostrando uma redução de 9,38 %. Esta condição está ligada diretamente ao comportamento da DS (**Tabela 6**), e não ao efeito da vinhaça no atributo.

Para a questão relacionada com as camadas no perfil do solo, observou-se que houve resposta estatística a $p \leq 0,01$ pelo teste F (**Tabela 5**), sendo representada pela equação $Y = 43,457 - 0,409X + 0,0095X^2 - 0,00009X^3$, e com um $R^2 = 0,8137$ %, coeficiente este que explica apenas 81,37 % dos casos por meio do modelo proposto, indicando que a porosidade depende da interação entre argila e DS. Vale salientar que a presença da vinhaça não influenciou na modificação desse atributo.

A interação entre ambiente com uso da vinhaça foi significativa pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$, com a USA apresentando a sua média igual a 43,90 %, sendo

maior em 36,01 % em relação a UMA (32,35 %). Enquanto a interação de vinhaça com as camadas do solo, apenas as três últimas camadas do solo apresentaram diferenças, com vantagem para área que não recebeu vinhaça, ficando as camadas com as seguintes superioridades: 20-40 cm com 12,81 %, 40-70 cm com 17,29 % e 70-100 cm com 8,65 %. Como a porosidade está diretamente ligada ao efeito da compactação, acredita-se que a área com vinhaça teve maior trânsito de máquinas, e como a interferência do efeito da compactação mecânica atua com maior incidência até a profundidade de 20 cm, poderá ser a razão da PTS ser maior na área sem vinhaça e abaixo de 20 cm (KLEIR; LIBARDI, 2002; VASCONCELOS et al., 2012).

A interação entre ambiente e as camadas no perfil do solo, significativa pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$, foi influenciada pelo efeito ambiente que apresentou alto índice de superioridade, mostrando que as diferenças para todas as camadas foram, respectivamente, 20,73, 39,92, 35,43, 21,80 e 33,33 % com valores maiores para USA, indicando que suas camadas apresentaram maiores índices de PTS do que os da UMA, ao longo de todo perfil do solo.

Referindo-se aos resultados obtidos no campo e as análises conduzidas no laboratório, percebe-se, pelo valor muito baixo do CV (%) = 6,75, que houve uma precisão muito grande em relação aos resultados apresentados pelo atributo.

5.2 - Atributos químicos dos solos nas UMA e USA

Os resultados da análise de variância dos atributos químicos dos solos coletados nas usinas UMA e USA estão apresentados na **Tabela 14**. Observa-se que de acordo com o teste F, aplicado para nível de 0,01 de probabilidade, para a fonte de variação usinas houve diferença significativa sobre os atributos P, K^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, MOT e % K_{CTC} . E não Houve diferença significativa a $p \leq 0,05$ pelo referido teste para os atributos pH e CSA, ou seja, os resultados obtidos para as duas usinas são iguais do ponto de vista estatístico para esses atributos.

Para a fonte de variação vinhaça, os atributos pH, P, K^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, MOT, CSA e % K_{CTC} apresentaram diferença significativa a 0,01 de probabilidade pelo

teste F, enquanto o atributo CTC não apresentou diferença a 0,05 pelo referido teste (**Tabela 14**), isto quer dizer, do ponto de vista estatístico, que pelos resultados obtidos, a utilização da vinhaça não interferiu no atributo CTC.

Para a fonte de variação referente às diferentes camadas, os atributos pH, P, K^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, MOT, CSA, e CTC apresentaram diferença significância a 0,01 de probabilidade pelo teste F, porém apenas o atributo % K_{CTC} não apresentou diferença significativa a 0,05 de probabilidade pelo mesmo teste (**Tabela 14**), do ponto de vista estatístico, o atributo % K_{CTC} não apresentou diferenças entre as camadas do solo.

No que concerne à interação entre as fontes de variação usinas versus vinhaça, houve diferença significativa ao aplicar o teste F a 0,01 de probabilidade para os atributos pH, P, K^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, CTC e % K_{CTC} ; no entanto não houve diferença significativa pelo teste F ao nível de 0,05 de probabilidade para os atributos MOT, CSA e CTC (**Tabela 14**), caracterizando que esses atributos apresentaram, pela avaliação estatística, teores praticamente iguais, entre si, quando se fez a interação das referidas fontes.

A interação entre as fontes de variação usinas versus camadas apresentou diferença significativa pelo teste F ao nível de $p \leq 0,01$ para os atributos P, K^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, MOT, CTC e % K_{CTC} . Não houve diferença significativa, pelo mesmo teste, ao nível de 0,05 de probabilidade para os atributos pH e CSA (**Tabela 14**), mostrando que esses atributos apresentaram, do ponto de vista estatístico, teores praticamente iguais, entre si, quando se fez a interação das referidas fontes.

Para interação entre as fontes de variação vinhaça versus camadas do solo, houve diferença significativa pelo teste F ao nível de 0,01 de probabilidade para os atributos P, $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, MOT, CSA e % K_{CTC} . Houve diferença significativa a 0,05 de probabilidade apenas para CTC, já que os atributos pH e K^+ não apresentaram diferença estatística (**Tabela 14**), ou seja, os resultados obtidos para a referida interação são iguais do ponto de vista estatístico para esses atributos.

Tabela 14 - Análise de variância dos atributos químicos dos solos coletados em cinco camadas nas UMA e USA, em áreas com e sem vinhaça.

C. Variação	GL	pH	P	K	Ca+Mg	MOS	CSA	CTC	K _{CTC}
Ambiente Am	1	NS	**	**	**	**	NS	**	**
Condições Co	1	**	**	**	**	**	**	NS	**
Camadas Ca	4	**	**	**	**	**	**	**	NS
R. Linear	1	**	**	**	**	**	**	**	NS
R.Quadr.	1	NS	**	**	**	*	NS	**	NS
R.Cúbica	1	NS	NS	**	NS	**	NS	NS	NS
Int. Am x Co	1	**	**	**	**	NS	NS	NS	**
Int. Am x Ca	4	NS	**	**	**	**	NS	**	**
Int. Co x Ca	4	**	**	NS	**	**	**	*	**
Int. Am x Co x Ca	4	**	**	**	**	NS	NS	NS	*
CV (%)		8,61	40,22	20,57	28,74	25,23	32,23	14,92	25,19

Fonte: autor, 2013. * - significativo a $p \leq 0,05$; ** - significativo a $p \leq 0,01\%$ e NS - não significativo.

Para interação entre as fontes de variação usinas versus vinhaça versus camadas houve diferença significativa pelo teste F ao nível de 0,01 de probabilidade para os atributos pH, P, K⁺ e Ca²⁺ + Mg²⁺. E houve também, pelo mesmo teste, diferença significativa a 0,05 de probabilidade apenas para o atributo K_{CTC}, porém os atributos MOT, CSA e CTC não apresentaram diferença estatística (**Tabela 14**), caracterizando que esses atributos apresentaram, pela avaliação estatística, teores praticamente iguais, entre si, quando se fez a interação das referidas fontes.

5.2.1 - Mudanças causadas pela vinhaça no pH do solo na UMA

As determinações de pH que foram feitas nas amostras de solos provenientes da UMA estão listadas na **Tabela 15**. A partir do comportamento geral dos resultados apresentados para as diferentes condições estudadas (sem e com vinhaça) foi possível constatar que aconteceu uma diminuição contínua no sentido descendente nas camadas do solo. Esse comportamento está de acordo com trabalhos conduzidos por Rossetto et al. (2008, p. 301) quando constataram a elevação do pH no solo que recebeu vinhaça e atribuíram-na à adição do material orgânico ao solo em condições aeróbias, que, com o passar do tempo, proporciona a oxidação do carbono orgânico, com redução do oxigênio (O₂), gerando espécies reduzidas que apresentam forte característica alcalina (OH⁻), consumindo os íons geradores de acidez (H⁺). Outra possível reação que pode acontecer será a complexação entre o Al³⁺ e os ânions orgânicos presentes na vinhaça (UNESP, 2007).

Tabela 15 - Resultados do pH nos solos coletados nas UMA e USA, até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

		Profundidades (cm)				
Atributos	Áreas	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
Ph	UMA-SV	6,40 ^{a(1)}	6,31 ^a	5,24 ^a	4,98 ^a	4,68 ^a
	UMA-CV	6,07 ^a	6,13 ^a	5,93 ^a	5,66 ^a	5,60 ^b
	USA-SV	5,93 ^a	5,35 ^a	5,03 ^a	4,49 ^a	4,44 ^a
	USA-CV	6,80 ^b	6,80 ^b	6,46 ^b	5,89 ^b	4,94 ^a

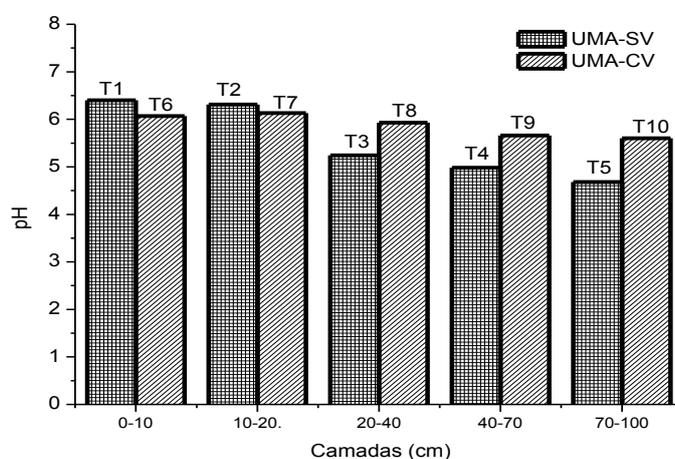
Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

De acordo com as características físico-químicas que a vinhaça possui, dentre elas está o pH em torno de 4,00, era de se esperar que acontecesse um aumento substancial na acidez do solo que a recebeu, mas isso não aconteceu, pois houve uma moderada redução do pH em relação à testemunha, alcançando uma faixa de acidez mediana, afirmativa esta que está de acordo com vários pesquisadores como Almeida et al. (1952); Orlando Filho et al. (1983); Silva (1983); Santos (2000); Sousa et al. (2007); Barros et al. (2011), quando afirmaram que a adição de vinhaça ao solo eleva o seu pH, mesmo sendo uma mudança passageira, voltando aos valores originais após um determinado período de tempo.

Como se trata de um solo que vem recebendo vinhaça há bastante tempo, é comum esperar que o pH permaneça por mais tempo sem retornar aos valores da fase inicial (RODELLA et al., 1983), motivado pela aplicação periódica da vinhaça que é feita na área tratada. Apesar de se observar que a vinhaça se comportou de maneira similar ao efeito pedogenético desse tipo de solo (Argissolo), que se caracteriza pela diminuição do valor do pH quando a amostragem é feita no sentido descendente nas camadas do solo, ou seja, diminui o seu valor quando se aprofunda no solo.

A **Figura 15** mostra uma pequena variação entre os tratamentos na área que recebeu vinhaça, com o pH em todas as profundidades do solo com teores acima de 5,50, valores esses que são considerados como bons segundo Sousa et al. (1985), quando é determinado em água na proporção 1:2,50.

Figura 15 - Teores de pH dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Quando se considerou a variação do pH nas diferentes camadas do solo; observou-se que praticamente a diferença entre os dois tratamentos iniciais (T₆ e T₇) foi insignificante, da ordem de 0,01 %, constatando-se que eles eram pouco mais alcalinos do que as demais camadas (20-40, 40-70 e 70-100 cm) e mais ácidos do que os tratamentos T₁ e T₂ da testemunha (**Figura 15**), resultados estes que foram confirmados por Bebé et al. (2009), quando estudaram um solo com uso da vinhaça em cana-de-açúcar cultivada em uma lagoa de decantação, confirmando que o pH decresceu no perfil do solo nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade.

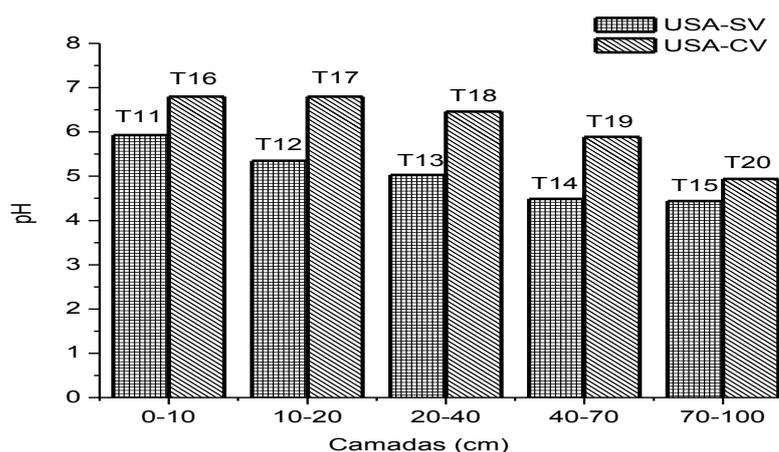
A **Figura 15** mostra que ocorreram variações mais perceptíveis nas camadas mais abaixo do solo, de modo que para os tratamentos T₈, T₉ e T₁₀ a acidez foi aumentando com o aumento da profundidade, no entanto, esses tratamentos apresentaram valores de pH superiores, respectivamente, aos da testemunha, apesar desses efeitos acontecerem em um solo que apresenta um poder tampão baixo, motivado pelos elevados teores de areia e reduzidas quantidades de argila e MOS (**Tabelas 8, 10 e 23**), concordando com Rossetto (2008).

5.2.2 - Mudanças causadas pela vinhaça no pH do solo na USA

Avaliando os resultados referentes ao pH nos solos da USA foi possível se constatar, ao observar a **Figura 16**, que aconteceu uma diminuição nos valores do pH à medida que se deslocava no sentido da última camada (70-100 cm), para ambas as áreas. Fazendo-se a comparação entre as diferentes camadas do solo, na área que recebeu vinhaça (tratamentos T₁₆ até T₂₀), notou-se uma diminuição dos valores de pH no sentido descendente do perfil do solo, porém, não houve grande variação entre qualquer camada e a seguinte, isto é, entre a primeira e a segunda, entre a segunda e a terceira, e assim por diante, excetuando o tratamento T₂₀ que foi muito abaixo dos demais.

Observando-se ainda, para os tratamentos que receberam vinhaça (**Tabela 15**), que foi possível se fazer a comparação entre eles, como ocorreu entre T₁₆ e T₁₇, que foram exatamente iguais, porém este foi 5,23 % superior ao tratamento T₁₈; enquanto entre T₁₈ e T₁₉ a diferença passou para 9,73 %, aumentando para 19,19 % quando se compara T₁₉ com T₂₀.

Figura 16 - Teores de pH dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

A atribuição da superioridade dos valores destes tratamentos, em relação aos da área sem vinhaça, pode estar ligada à interferência do complexo sortivo do solo (**Figura 22**), que, conseqüentemente interfere nos valores de pH, conforme se pode

ver que a utilização do resíduo foi responsável por uma melhoria dos atributos no solo em relação aos tratamentos sem vinhaça. Estes resultados concordam com os encontrados por Silva et al. (2007), quando relataram que o aumento do pH dos solos tratados com vinhaça, principalmente em áreas cultivadas há muito tempo, estão relacionados com a eliminação de gases, provenientes das ações dos microrganismos presentes no solo (ROSSETTO, 1987; SILVA; RIBEIRO, 1998, OLIVEIRA et al., 2013).

5.2.3 - Interações entre as variáveis ligadas ao pH do solo nas UMA e USA

Quando foram avaliadas as combinações entre as variáveis com e sem vinhaça, verificou-se que houve diferença entre as médias dos tratamentos (SV = 5,31 e CV = 5,97), permitindo que o efeito da vinhaça fosse superior em 12,43 %, enquanto foi modesta a influência da vinhaça nas camadas do solo, mostrando uma pequena redução no atributo quando a tendência era aumentar a profundidade nas camadas do perfil do solo; sendo essa influencia explicada pelo modelo matemático da equação linear $Y = 6,29 - 0,017X$, com explicação de 97,87 % do fenômeno por meio do modelo proposto.

Tabela 16 - Análise fatorial (2²x5) do pH nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	5,64 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	5,64 ^a	6,16 ^{a(1)}	5,83 ^a	5,26 ^a	4,74 ^a	4,56 ^a
SV	5,31 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	5,97 ^b	6,43 ^a	6,19 ^a	6,19 ^b	5,77 ^b	5,27 ^b
Camadas		6,21	6,03	5,78	5,35	4,83
UMA-SV	5,52 ^b	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	5,10 ^a	6,23 ^a	5,95 ^a	5,58 ^a	5,32 ^a	5,14 ^a
UMA-CV	5,77 ^a	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	6,17 ^b	6,38 ^a	6,38 ^a	5,87 ^a	5,19 ^a	4,69 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Referindo-se às variáveis, observou-se que houve interação apenas entre ambiente e a presença da vinhaça, ao nível de $p \leq 0,05$ pelo teste F, com uma diferença de 6,93 % em favor da USA, com média de 6,17 e um CV (%) = 8,61, indicando que os dados apresentaram uma excelente precisão.

5.2.4 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de fósforo na UMA

Comparando os resultados dos teores de P das análises do solo da área que recebeu vinhaça, com aqueles da área que não a recebeu (testemunha) (**Tabela 17**), foi possível se constatar, nas três primeiras camadas, a superioridade para os tratamentos que receberam o resíduo, onde se verificou as seguintes diferenças entre os tratamentos das duas áreas: 69,73 % entre T₆ e T₁, 71,06 % entre T₇ com T₂ e 217,57 % entre T₈ e T₃. Portanto, a área que recebeu vinhaça mostrou superioridade à área testemunha, respectivamente nas três camadas da superfície (0-10, 10-20 e 20-40 cm).

Tabela 17 - Resultados de fósforo (mg dm^{-3}) dos solos das usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	o	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
P (mg dm^{-3})	UMA-SV	24,88 ^{a(1)}	15,93 ^a	7,00 ^a	4,10 ^a	1,33 ^a
	UMA-CV	42,23 ^b	27,25 ^a	22,23 ^b	3,30 ^a	0,95 ^a
	USA-SV	23,59 ^a	11,57 ^a	4,85 ^a	1,21 ^a	0,48 ^a
	USA-CV	197,85 ^b	190,79 ^b	78,54 ^a	3,05 ^a	1,94 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

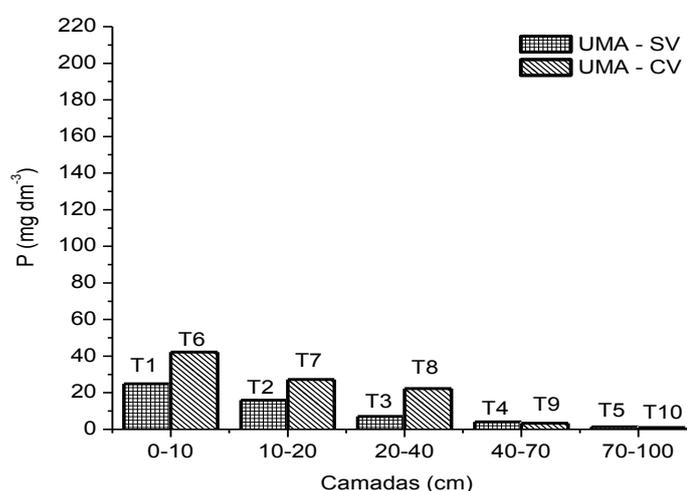
Já que os teores de P foram muito baixos e praticamente semelhantes nas demais camadas (40-70 e 70-100 cm), pode-se afirmar, mediante os resultados de P obtidos nas áreas testemunha e com vinhaça (**Tabela 17**), que é um nutriente que não se desloca com facilidade no solo, ficando mais restrita a sua presença nas camadas mais superficiais do solo (NEVES et al., 1983; LEAL et al., 2008; SANTOS et al., 2008).

Como se pode ver, praticamente todo o P se concentrava nas três primeiras camadas do solo, sobretudo aquele proveniente da vinhaça, tendo em vista que sua

aplicação foi toda feita na superfície do solo (em cobertura), daí, o tratamento que a recebeu alcançou os níveis mais expressivos justamente nas camadas superficiais, estando de acordo com resultados obtidos por Santos et al. (2008).

Quando se deslocou no sentido das camadas mais profundas do solo, o teor de P vai diminuindo ligeiramente nas três primeiras camadas e acentuadamente nas duas finais, independente da área ter sido ou não tratada com vinhaça, isto é comum em todos os solos que recebem adubação química (MACHADO et al., 2011).

Figura 17 - Teores de fósforo (mg dm^{-3}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Também, uma das formas de avaliar as cargas superficiais dos coloides do solo que capturam o P é avaliando o ponto de carga zero (PCZ) existente no meio, uma vez que ele depende da proporção dos constituintes minerais, orgânicos e dos óxidos de Fe^{2+} e de Al^{3+} presentes no solo, que contribuem para o aumento das cargas positivas e do PZC (RIBEIRO et al., 2011). Esta combinação favorece o aprisionamento dos íons fosfato (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), favorecendo a adsorção desses íons aos óxidos presentes nas camadas superficiais do solo, conseqüentemente, impedindo-os de se deslocar no solo. Este fenômeno ocorre no lado positivo do ponto de inflexão da curva eletrocapilar, formada no plano de coordenadas de

densidade de cargas das partículas minerais (argila e MOS) com o campo magnético (BRETT et al., 1996).

5.2.5 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de fósforo na USA

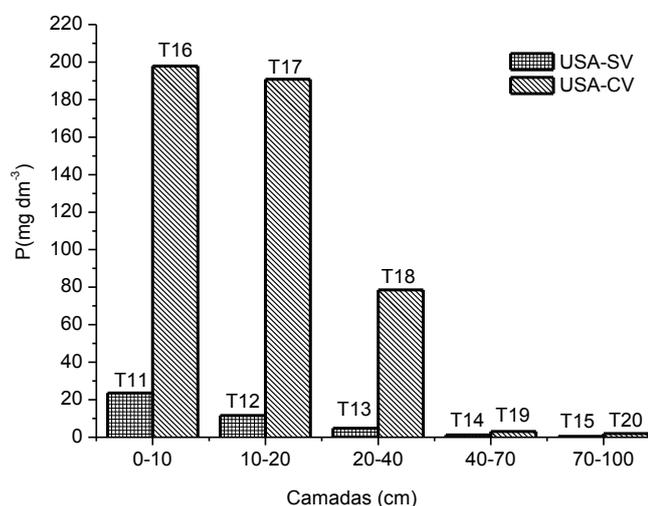
Para avaliação dos teores de P apresentados na **Tabela 17**, visando a comparação entre as duas áreas (com e sem vinhaça), vê-se que a vinhaça contribuiu para elevar os teores desse nutriente no solo, portanto, na primeira camada (T_{16}) o valor do P foi de $197,85 \text{ mg dm}^{-3}$, que corresponde em torno de 10 vezes a quantidade do nutriente que a cana-de-açúcar retira do solo para o seu desenvolvimento (ORLANDO FILHO, 1983); no entanto, esta camada é superior em 3,70 % à camada seguinte (10-20 cm), que, por sua vez, é 142,92 % acima da terceira camada (20-40 cm), sendo que este tratamento (T_{18}) foi 2.475,08 % maior do que o seguinte (T_{19}), deixando bem claro que 98,94% de todo o P existente no solo está concentrado na profundidade que vai até 40 cm, e, também, 82,31 % do nutriente se encontrava retido na profundidade que vai até 20 cm, observações similares foram conseguidas por Canellas et al. (2003); Machado et al. (2011).

Referindo-se às duas últimas camadas (40-70 e 70-100 cm), estas mostraram níveis insignificantes do nutriente, sendo a razão atribuída à própria natureza geomorfológica do solo, com níveis muito baixos para as camadas profundas, reforçando ainda mais a afirmativa do princípio de que este elemento químico não se desloca com facilidade no perfil do solo, e que, independentemente do tratamento ter recebido vinhaça, o PCZ da fração argila diminui exponencialmente com o aumento da quantidade de P adsorvida (RIBEIRO et al., 2011).

Os íons fosfatos ($\text{HPO}_4^=$ e H_2PO_4^-), que mesmo estando nas formas mais solúveis e absorvíveis pelas plantas, mostraram suas características fundamentais de sempre permanecerem localizados nas camadas superficiais, ou nos locais onde foram colocados mediante a adubação de fundação ou cobertura, a exemplo do que aconteceu pela adição da vinhaça na superfície do solo, onde se constatou que o P proveniente da vinhaça só apareceu nas três primeiras camadas do solo (até 40 cm), concordando com trabalhos desenvolvidos por Barros et al. (2011).

Observando-se os tratamentos pela **Figura 18**, nota-se que o tratamento da primeira camada que recebeu vinhaça (T₁₆) apresentou uma diferença de 738,70 % a mais do que T₁₁ (sem vinhaça), 1.549,00 % para camada de 10-20 cm, (T₁₇ vs T₁₂); passando para 1.519,38 % na camada de 20-40 cm (T₁₈ vs T₁₃), caindo bruscamente para 152,07 % na penúltima camada (T₁₉ vs T₁₄) e finalizando com 304,17 % para última camada (T₂₀ vs T₁₅). Estes resultados confirmam que é até 40 cm de profundidade onde se encontra a maior quantidade de P, com níveis elevadíssimos em relação ao nível considerado como alto pela literatura (a partir de 20 mg dm⁻³) e, conforme relatam Meurer et al. (2004), os teores de P total, que é absorvido da solução do solo na forma iônica (H₂PO₄⁻ ou HPO₄²⁻), são relativamente altos nos solos, porém o P disponível está abaixo dos níveis recomendados como bons para as culturas, na profundidade abaixo de 40 cm, pois, passou para valores considerados como muito baixos nessas camadas (MACHADO et al., 2011; BNB, 2012).

Figura 18 - Teores de fósforo (mg dm⁻³) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

5.2.6 - Interações entre as variáveis ligadas ao fósforo nas UMA e USA

Observa-se pela **Tabela 14** que as comparações feitas para as fontes de variação ambiente (UMA e USA), efeitos da vinhaça e as camadas do solo

apresentaram significâncias pelo teste F, a 0,01 de probabilidade. Enquanto a variável ambiente representada pela USA (44,96 mg dm⁻³) apresentou uma diferença de 201,00 % sobre a UMA (14,94 mg dm⁻³), enquanto o efeito vinhaça também foi superior em 430,92 % quando comparado ao padrão.

A variação das camadas do solo resultou na regressão quadrática que gerou a equação $Y = 79,946 - 2,235X + 0,015X^2$, podendo esta explicar, mediante o coeficiente R², 93,78 % da variabilidade do caso, nesta ocasião, confirmando que os teores de P decrescem à medida que aumenta a profundidade do solo (LEAL et al., 2008).

Tabela 18 - Análise fatorial (2²x5) de fósforo (mg dm⁻³) dos solos nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	14,94 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	44,96 ^b	24,23 ^a	13,75 ^a	5,19 ^a	2,66 ^a	0,91 ^a
SV	9,49 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	50,40 ^b	102,36 ^b	107,66 ^b	37,34 ^b	3,19 ^a	1,44 ^a
Camadas		69,15	49,86	26,67	3,36	0,68
UMA-SV	10,65 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	8,34 ^a	33,55 ^a	21,59 ^a	14,70 ^a	3,70 ^a	1,14 ^a
UMA-CV	19,23 ^a	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	81,57 ^b	93,00 ^b	99,84 ^b	28,55 ^b	2,15 ^a	1,21 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de p ≤ 0,05.

A interação entre o ambiente (UMA e USA) e os efeitos da vinhaça no solo apresentou significância, pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade, para a média da USA que foi de 6,17 mg dm⁻³, ficando com 6,93 % acima da média da UMA (5,77 mg dm⁻³), permitindo mostrar que a vinhaça trouxe benefício aos solos das duas usinas, já que a diferença entre elas foi pequena (**Tabela 18**).

Entre ambiente e camadas do solo a interação, com o mesmo nível de significância da interação anterior (**Tabela 18**), revelou que a USA apresentou as

médias (93,00, 99,83 e 28,55 mg dm⁻³) das suas três primeiras camadas (T₁₆, T₁₇ e T₁₈), com percentuais acima das respectivas médias (33,55, 21,59 e 14,70 mg dm⁻³) das camadas (T₆, T₇ e T₈) da UMA em 177,21, 362,42 e 94,22 %, sendo as demais camadas NS.

Constatou-se idêntico comportamento ao da interação anterior (ambiente confrontado com camadas do solo), quando foi feita a comparação entre as médias da vinhaça e das camadas do solo, destacando-se a variante vinhaça que apresentou as médias das três primeiras camadas, com percentuais de: 322,55, 683,00 e 619,12 % acima das médias das camadas do solo da área sem vinhaça (**Tabela 18**).

Como o P se concentrou nas camadas superficiais do solo, apresentando valores altos e praticamente inexistindo nas demais, o valor alto do CV (%) = 40,22 mostrou que há uma grande dispersão entre os teores do atributo no solo, e, conseqüentemente, não apresentando precisão entre os dados.

5.2.7 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de potássio na UMA

Na **Tabela 19** são mostrados os resultados dos teores de potássio (K⁺) trocável, o qual se envolve com a fração que se encontra ligada às cargas negativas presentes nas superfícies das partículas orgânicas (húmus) e inorgânicas (minerais de argila silicatada, óxidos e hidróxidos) do solo (ERNANI et al., 2007), sendo que a presença dessas partículas é de interesse para a nutrição vegetal, visto que restituem rapidamente o teor de K⁺ perdido por lixiviação ou aquele que é retirado da solução do solo pelas plantas.

Em função da vinhaça apresentar, na sua composição química, diversos nutrientes indispensáveis à sobrevivência das plantas, é o K⁺ que aparece em maior quantidade dentre os minerais presentes no resíduo, variando de 1,01 a 7,60 kg m⁻³ de K₂O (ORLANDO FILHO et al., 1983), respectivamente, para os mostos de caldo e de melaço diluído (com caldo ou água). Por esse motivo, a recomendação da dosagem de vinhaça a ser aplicada no solo comumente é baseada na concentração do K⁺ nela contido; mais o nível deste nutriente já existente no solo, para saber o

total de K^+ que passará a existir no solo e depois descontar a quantidade do nutriente que a planta vai retirar do solo para sua sobrevivência.

Para tanto, conforme orientam Rosetto et al. (2008), a dosagem de vinhaça que deverá ser aplicada no campo poderá ser recomendada com base na fórmula seguinte:

$$V_V = [(0,05 \times CTC_{pH\ 7} - K_s) \times 3744 + 185] \times K_V^{-1}, \quad (15)$$

sendo:

V_V - Volume de vinhaça a ser aplicado no solo ($m^3\ ha^{-1}$),

$CTC_{pH\ 7}$ – Capacidade de Troca de Cátions-pH 7,0 ($cmol_c\ dm^{-3}$),

K_s – concentração de potássio no solo a 80 cm ($cmol_c\ dm^{-3}$),

K_V – concentração de potássio na vinhaça em K_2O ($kg\ m^{-3}$),

3.744 – constante que transforma o resultado da análise de fertilidade do solo, expressa em $cmol_c\ dm^{-3}$ para kg de K_2O em uma área de 1 ha com 80 cm de profundidade.

185 – constante que corresponde aos kg de K_2O extraídos pela cana-de-açúcar em uma área de 1 ha, por cada corte.

Em função do K^+ se encontrar presente na vinhaça em maior quantidade em relação aos demais elementos químicos, naturalmente é de se esperar que o solo que a recebe possa apresentar níveis maiores do nutriente do que a testemunha, conforme mostra a **Figura 19**.

Observa-se na **Tabela 19** que os teores de K^+ em todos os tratamentos da área com vinhaça foram superiores aos da área testemunha, respectivamente para as mesmas camadas do solo, com teores que poderão ser avaliados pela **Figura 19**, esclarecendo melhor como ocorreu o deslocamento do K^+ ao longo do perfil do solo, motivado pelas seguintes manifestações:

Tabela 19 - Resultados de potássio ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) dos solos das usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

		Profundidades (cm)				
Atributo	Áreas	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
K^+ ($\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$)	UMA-SV	40,00 ^{a(1)}	35,25 ^a	24,75 ^a	19,25 ^a	16,50 ^a
	UMA-CV	58,00 ^a	60,00 ^a	77,75 ^b	95,25 ^b	83,25 ^b
	USA-SV	108,75 ^a	64,25 ^a	35,38 ^a	16,09 ^a	14,25 ^a
	USA-CV	232,50 ^b	151,25 ^b	88,75 ^b	77,09 ^b	59,67 ^a

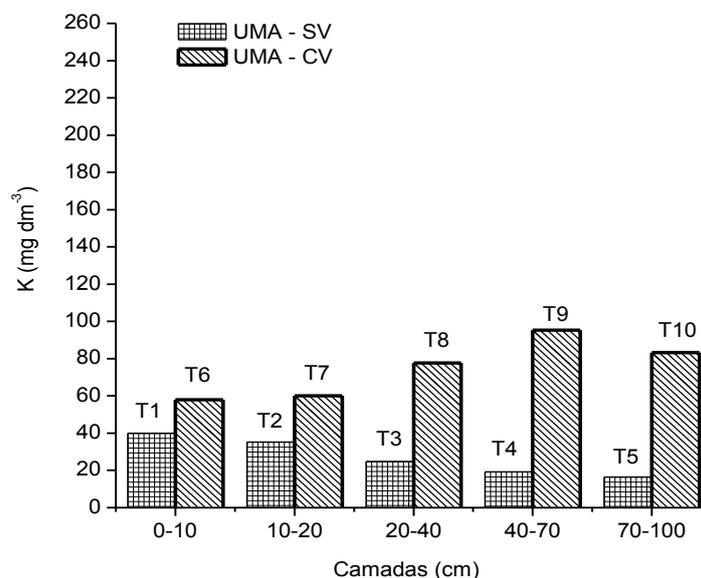
Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

a) em primeiro lugar, por se tratar de um elemento químico cuja presença, em concentrações elevadas na solução do solo, torna-se suscetível ao processo de lixiviação para as camadas mais profundas, concordando com Bebé (2007);

b) em segundo lugar, a quantidade de vinhaça que foi aplicada por longa temporada na área favoreceu ao aumento da concentração de K^+ em todas as camadas do solo, possibilitando o surgimento de um gradiente que contribuiu para aumentar esse nutriente em direção ao último tratamento (T_{10}), na camada de 70-100 cm, resultados que estão de acordo com os obtidos por Bebé et al. (2009), quando estudaram um Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico, cultivado com cana-de-açúcar, que recebeu $300\ \text{m}^3\ \text{ha}^{-1}$ de vinhaça durante 15 anos, confirmando a elevação do K^+ no perfil do solo, quando comparada com o solo que não recebeu vinhaça, especialmente na camada de 0-10 cm, com os valores de K^+ superiores aos das camadas de 10-20 e 20-40 cm;

c) e em terceiro lugar, pela contribuição atribuída à água de chuva na temporada (PAULINO et al., 2010), facilitando o deslocamento do nutriente pelas camadas do solo, concordando com Silva (2012) que encontrou em solos com baixa CTC e bem drenados, um teor de K^+ que foi facilmente lixiviado, pois os cátions trocáveis são retidos pelo solo seguindo a ordem liotrópica da energia de retenção na seguinte ordem: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, onde o K^+ ocupa a penúltima posição da energia de adsorção desta série (RAIJ, 2011).

Figura 19 - Teores de potássio (mg dm^{-3}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Por outro lado, sabe-se que os teores elevados de areia (**Tabela 8**) e os reduzidos percentuais de argila (**Tabela 10**) contribuíram para que o K^+ se deslocasse com maior facilidade no solo, concordando com Nicochelli et al. (2012), quando afirmaram que em camadas de solos arenosos é comum acontecer pouca sorção de cátions.

Observa-se pela **Tabela 19** que os teores de K^+ no solo da testemunha foram decrescendo com o aumento da profundidade, isto mostra que as diferenças entre os tratamentos tendem a se elevar gradativamente. Fazendo-se a comparação entre as respectivas camadas dos solos nas duas áreas (com e sem vinhaça), obteve-se para primeira camada de 0-10 cm (T_6 vs. T_1) uma diferença de 45 %, sendo de 70,21 % para comparação entre T_7 e T_2 ; 214,14 % entre T_8 e T_3 , 394,81 % entre T_9 e T_4 , além de 404,55 % para os tratamentos T_{10} e T_5 , a favor da área com vinhaça.

A contribuição dada pela vinhaça para elevar o teor de K^+ a ser adicionado ao solo é importante para aumentar a quantidade desse nutriente no complexo sortivo

do solo, conforme se pode ver pela **Figura 19**, juntamente com os teores dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} (**Tabela 21**), observação que também foi referenciada por Camargo et al. (1983).

Tomando-se como exemplo os teores de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , respectivamente de 0,0425; 0,0229 e 0,0015 $\text{mol}_c \text{L}^{-1}$, que foram originários da média de vinte resultados de análises das amostras da vinhaça nas duas usinas, coletadas no decorrer de cinco anos. Com esses dados, foi possível calcular o quociente de atividade do K^+ na solução do solo, para ser comparado com a atividade dos demais cátions, no caso específico dessa condição representados pelos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , por serem, juntamente com o K^+ , os elementos químicos que aparecem em maior expressão na composição química da vinhaça.

Portanto, para correlacionar o K^+ com $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$; levou-se em consideração o coeficiente de seletividade (K_g) desse solo seria igual à unidade (devida às unidades adotadas), para se poder aplicar a equação de Gapon (CAMARGO et al., 1983; RAIJ, 2011), que será dada por:

$$Y^+_{\text{troc}} \cdot (Y^{2+}_{\text{troc}})^{-1} = K_g \cdot K^+_{\text{v-sol}} \cdot (\text{Ca}_{\text{v-sol}}^{2+} + \text{Mg}_{\text{v-sol}}^{2+})^{-1/2} \quad (16)$$

onde:

Y^+ → cátions monovalentes (K^+ ou Na^+ trocável);

Y^{2+} → cátions divalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis);

K_g → coeficiente de seletividade;

v → indica que o nutriente está contido na vinhaça;

K^+_v → potássio presente na vinhaça (solúvel);

Ca^{2+}_v → Cálcio presente na vinhaça (solúvel);

Mg^{2+}_v → Magnésio presente na vinhaça (solúvel).

Aplicando-se a equação (16), têm-se, então:

$$Y^+ \times (Y^{2+})^{-1} = (1) \times 0,0245 \times (0,0215 + 0,0148)^{-1/2}. \text{ Daí,}$$

$$Y^+ \times (Y^{2+})^{-1} = 0,223. \text{ Como: } Y^+ = 0,223 \times Y^{2+}, \text{ e, fazendo-se}$$

$Y^+ + Y^{2+} = 100\%$, resulta então:

$0,223 \times Y^{2+} + Y^{2+} = 100\%$, sendo: $Y^{2+} = 100/1,223$; então:

$Y^{2+} = 81,77\%$ e $Y^+ = 18,23\%$.

Como os cátions no complexo sortivo do solo estão em equilíbrio com os solúveis da solução do solo, selecionou-se, então, apenas três cátions presentes na vinhaça, ou seja, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} ; para demonstrar acontece a adsorção desses íons na fração sólida do solo, onde, de acordo com a equação (16), o K^+_{sol} contribui com 18,23% e o $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ com 81,77 % para ocuparem os sítios de cargas medidos na CTC do solo.

Sabe-se que o intervalo de 3 a 5 % da CTC é o espaço teórico recomendado pela literatura e que pode ser ocupado pelos íons K^+ , enquanto a faixa de 70 a 90 % também o é para os cátions $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (LOPES; GUILHERME, 2004), deixando claro que para esta situação o K^+_{sol} proveniente da vinhaça aplicada ($100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) passará para o solo com teores que podem equivaler a 18,23 % do K^+_{troc} , então, para haver equilíbrio há necessidade que os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} da vinhaça sejam trocados pelo K^+ presente no complexo sortivo do solo, portanto, com um percentual maior do que aquele referenciado anteriormente para ocupar a CTC; enquanto para o $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ não aconteceu o mesmo a mesma situação, porque o percentual calculado está dentro da faixa que eles devem ocupar na CTC do solo (RAIJ, 2011).

5.2.8 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de potássio na USA

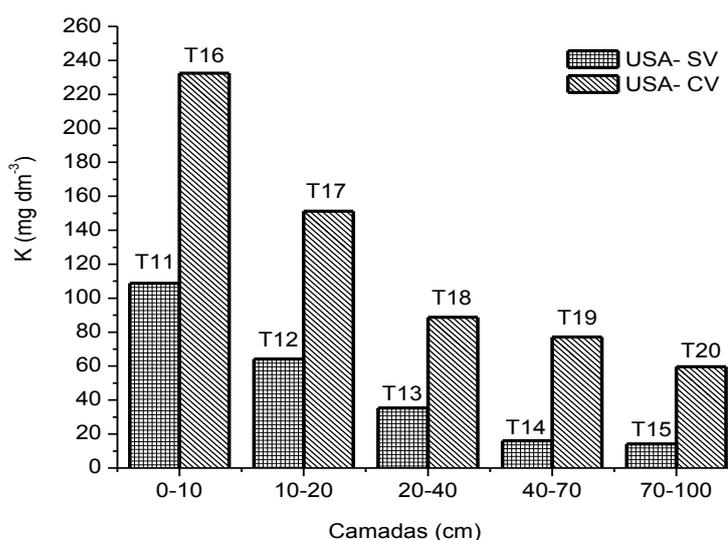
Diante dos dados da **Tabela 19** é possível afirmar que o K^+ presente no solo foi oriundo da vinhaça, em decorrência da diferença constatada entre os valores apresentados pela área que recebeu vinhaça e aqueles da área testemunha (sem vinhaça).

A **Figura 20** apresenta melhor visibilidade da presença do K^+ em todas as camadas, com valores altos e altíssimos nas duas camadas superficiais do solo (T_{16} e T_{17}), apresentando teores que estão acima dos considerados como altos pela literatura (ERNANI et al., 2007 p 574; BNB, 2012), pois nelas foram constatadas as diferenças mais marcantes, quando se verificou que foi de 53,72 % a diferença entre

os tratamentos T₁₆ e T₁₇, de 70,42 % a diferença entre T₁₇ e T₁₈, 15,13 % entre T₁₈ e T₁₉, e T₁₉ que foi superior em 29,19 % ao tratamento T₂₀, mostrando com isto que houve uma acumulação de K⁺ ao longo de todo perfil do solo, que teve o deslocamento facilitado através do fluxo de massa e favorecimento da percolação da solução do solo (BEBÉ, 2007).

Fazendo-se a comparação entre as duas áreas, pela **Tabela 19** é possível notar que entre os tratamentos T₁₆ e T₁₁ a diferença foi de 115,95 %; entre T₁₇ e T₁₂ foi de 135,41 %; com 150,84 % entre T₁₈ e T₁₃; passando para 379,12 % a diferença entre T₁₉ e T₁₄; finalizando com 318,74 % a diferença entre T₂₀ e T₁₅. Como as diferenças foram crescentes com o aumento da profundidade do solo, atribuiu-se à vinhaça a contribuição dada para promover esses aumentos nos teores de K⁺, como se pode observar nas camadas a partir de 40 cm (**Figura 20**), porque nas camadas mais profundas do solo que não recebeu vinhaça os valores de K⁺ eram considerados como baixos pela literatura (ERNANI et al., 2007 p. 574; BNB, 2012), uma vez que o solo natural é originário de rocha matriz que não era rica em potássio.

Figura 20 - Teores de potássio (mg dm⁻³) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Mesmo constatando que o deslocamento do K^+ no solo foi superior à testemunha em todas as camadas, não é motivo de preocupação quanto à possibilidade de lixiviação deste elemento químico para as camadas mais profundas, ao ponto de contaminar o lençol freático, devido ao equilíbrio que ocorrerá por motivo do planejamento da quantidade de vinhaça a ser aplicada na área, o conhecimento do percentual de extração da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2007) e a taxa de adsorção nos coloides do solo, estando de acordo com Cunha et al. (1981) quando mostraram que a acumulação do K^+ no solo não foi grande, porém, ficando retido na camada que vai até 50 cm de profundidade e sujeito a pequena lixiviação e drenagem no solo, fenômenos semelhantes foram observados por Brito et al. (2007), ao constatarem que doses crescentes de vinhaça aplicadas em Argissolo aumentaram a concentração de K^+ trocável, principalmente nas camadas mais superficiais do solo.

5.2.9 - Interações entre as variáveis ligadas ao potássio nas UMA e USA

A análise estatística (**Tabela 14**) correspondente às variáveis estudadas constatou que o ambiente, a vinhaça e as camadas do solo foram de suma importância para mostrar o aporte de K^+ fornecido à área que recebeu vinhaça, afirmativa baseada no nível de significância de $p \leq 0,01$, pelo teste F, para as três fontes de variação referenciadas anteriormente.

A variável ambiental mostrou que a média da USA foi de $82,53 \text{ mg dm}^{-3}$, superior em 61,81 % em relação a da UMA (51 mg dm^{-3}), esta diferença poderá ter sido influenciada pela precipitação média anual ocorrente na região (ver item 4.1) que foi de 2.058 mm, a qual poderá ter contribuído para que o nutriente se deslocasse mais no perfil do solo pelo fluxo de massa, e no caminhamento fosse adsorvido pelas partículas de argila do solo (**Tabela 20**).

No tocante ao efeito do uso da vinhaça, constatou-se que a média de $96,10 \text{ mg dm}^{-3}$ dessa variável foi 156,78% maior do que o da área sem vinhaça ($37,46 \text{ mg dm}^{-3}$). Finalizando com destaque para o efeito da variável camadas do solo que originou a equação $Y = 122,528 - 4,011X + 0,073X^2 - 0,000444X^3$, com um

coeficiente de determinação que poderá explicar 100 % dos casos por meio do modelo matemático proposto.

Tabela 20 - Análise fatorial (2²x5) do potássio (mg dm⁻³) dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	51,00 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	82,53 ^b	74,38 ^a	49,75 ^a	30,00 ^a	17,63 ^a	15,38 ^a
SV	37,46 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	96,10 ^b	134,00 ^b	105,63 ^b	83,25 ^b	86,13 ^b	71,50 ^b
Camadas		104,27	77,50	56,78	51,82	43,45
UMA-SV	27,15 ^a	Interação UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	47,70 ^b	49,00 ^a	47,63 ^a	51,25 ^a	57,25 ^{a(1)}	49,88 ^a
UMA-CV	74,85 ^a	Interação (USA . vs. camadas)				
USA-CV	17,35 ^b	159,38 ^b	107,75 ^b	62,00 ^a	46,50 ^a	37,00 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

A interação referente aos confrontos entre ambiente e o uso da vinhaça apresentou resposta significativa a 0,05 de probabilidade pelo teste de Tukey, podendo-se afirmar com segurança que a USA teve uma média de 117,35 mg dm⁻³, proporcionando uma diferença de 56,78 % a mais do que a UMA (74,85 mg dm⁻³), assegurando com certeza que os teores de K⁺ existentes na área foram provenientes do uso da vinhaça (**Tabela 20**).

Constatou-se, também, que houve diferença entre a interação de ambiente e camadas do solo, quando se verificou a maior distribuição do K⁺ apenas nas duas primeiras camadas do solo (0-10 e 10-20 cm), conforme se confirmou pela significância de 0,05 de probabilidade pelo teste de Tukey, ou seja, a USA foi superior em 225,25 % (para 0-10 cm) e 126,22 % (para 10-20 cm) em relação à UMA. Enquanto as demais camadas do solo foram não apresentaram significância quando se fez a comparação entre as usinas (**Tabela 20**).

Para interação entre as variáveis vinhaça e camadas do solo, constatou-se que as médias dos teores de K^+ tiveram maiores valores nos solos com vinhaça em todas as camadas do solo, diferindo da área sem vinhaça, quando se fez a comparação pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$ de probabilidade, obtendo-se 80,17, 112,31, 117,50, 388,65 e 365,04 %, respectivamente, de cima para baixo, para as cinco camadas do solo. Estes resultados estão de acordo com Nicochelli et al. (2012), que relacionam o aumento de K^+ com os teores de argila (**Tabela 10**).

Um motivo muito forte para confirmar a adsorção de K^+ nas camadas do solo, mediante o uso da vinhaça, está ligado aos modelos da dupla camada ligada à natureza física da região interfacial das partículas minerais trocadoras de íons (argila, MOS e óxidos), graças às características de solventes dipolares que a vinhaça possui, mediante a sua composição em torno de 93 % de água (SILVA, 1983), mostrando com isso que a concentração do solvente é muito maior que a concentração do soluto, possibilitando aplicar o modelo de Bockris, Devanathan e Müller, *apud* Brett (1996), fazendo com que as moléculas do solvente se aproximem da interface dos minerais formando uma camada juntamente com os íons especificamente adsorvidos.

Como o nutriente se concentrou nas camadas superficiais do solo, praticamente existindo em pequena quantidade nas demais, o CV (%) = 20,57 mostrou que existe uma grande dispersão entre os teores do atributo no solo.

5.2.10 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de Cálcio + Magnésio na UMA

Na **Tabela 21** são mostrados os resultados dos cátions trocáveis Cálcio + Magnésio ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$), extraídos com solução salina concentrada de cloreto de potássio ($1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$). Estes cátions apresentam comportamentos similares no tocante ao mecanismo das reações que diminuem a acidez do solo, como também atuam como nutrientes de grande importância para os vegetais, sendo considerados na classificação do nível de fertilidade como macronutrientes secundários, que na área sem vinhaça apresentaram uma redução gradual da camada superficial até a última camada do perfil do solo (SOUSA et al., 2007).

Fazendo-se as devidas comparações entre as camadas do solo na área onde foi aplicada a vinhaça, constatou-se que houve uma redução de 97,32 % do primeiro para o segundo tratamento (T_6 para T_7), a partir do tratamento T_8 os demais foram praticamente iguais entre si, obedecendo a um comportamento que se aproxima de uma reta paralela ao eixo das abscissas (**Figura 19**), indicando que houve uma movimentação desses cátions para as camadas do interior do solo, favorecidos pelos níveis elevados de areia (**Tabela 8**), que facilitaram o deslocamento destes íons no solo, onde tais aumentos e deslocamentos vão corroborar com as afirmativas de outros pesquisadores como Nunes et al. (1981); Barros et al. (2011), quando mostraram as melhorias no pH e na acidez total (ativa e potencial) do solo, proporcionadas pela presença desses cátions que contribuíram para reduzir a acidez do solo, elevando os valores do pH.

Tabela 21 - Resultados de Cálcio + Magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos das usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

		Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
Atributo $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	Áreas					
	UMA-SV	1,98 ^{a(1)}	1,95 ^a	1,04 ^a	0,57 ^a	0,51 ^a
	UMA-CV	2,76 ^a	1,40 ^a	1,42 ^a	1,57 ^b	1,44 ^a
	USA-SV	2,53 ^a	1,50 ^a	0,92 ^a	0,54 ^a	0,46 ^a
	USA-CV	6,38 ^b	5,43 ^b	3,95 ^b	2,06 ^b	0,63 ^a

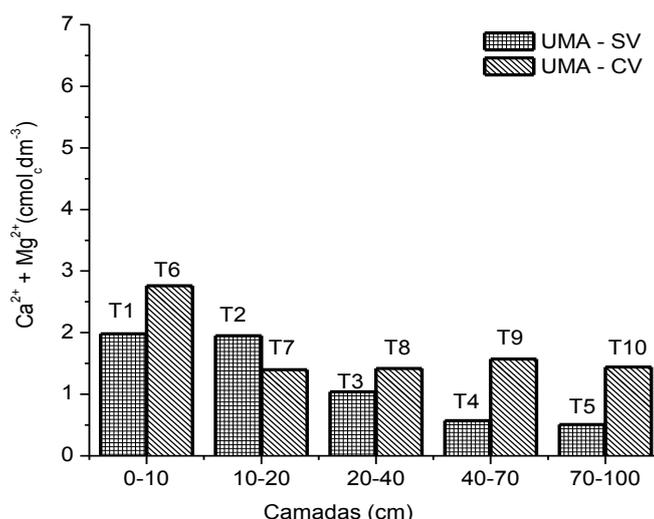
Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Para tornar os valores dos cátions das camadas mais profundas (além de 20 cm) praticamente iguais, acredita-se que este fenômeno está ligado aos valores baixos (e praticamente iguais) da CTC, que foi saturada com cátions permutados pela vinhaça e facilitou o deslocamento dessas bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) no perfil do solo, favorecidos pela topografia e boa drenagem (altos níveis de areia), favorecendo o deslocamento do Ca^{2+} e Mg^{2+} das camadas mais superficiais (até 20 cm); concordando com Silva (2012), quando diz que em solos com baixa CTC e bem drenados, os cátions trocáveis são retidos pelo solo obedecendo à ordem liotrópica da energia de retenção, assim distribuída: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ (RAIJ, 2011), pois, apesar das energias de retenção do Ca^{2+} e Mg^{2+} serem as maiores na ordem

apresentada, ainda assim possibilitam que eles se desloquem no solo, em uma proporção menor que os demais cátions da citada série (RAIJ et al., 1995).

Para os resultados dos solos com e sem aplicação da vinhaça, a **Tabela 21** revela que houve uma substancial lixiviação desses cátions para as camadas mais profundas, notando-se que entre as médias dos tratamentos T₆ e T₁ das camadas de 0-10 cm se constatou uma diferença de 39,39 %, entre T₇ e T₂ a diferença foi de 39,49 %, caindo um pouco para 36,54 % para comparação entre T₈ e T₃, indo para 175,44 % na penúltima camada (T₉ e T₄) e finalizando 182,35 % para os tratamentos T₆ e T₁ da última camada do solo.

Figura 21 Teores de Cálcio + Magnésio (cmol_c dm⁻³) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

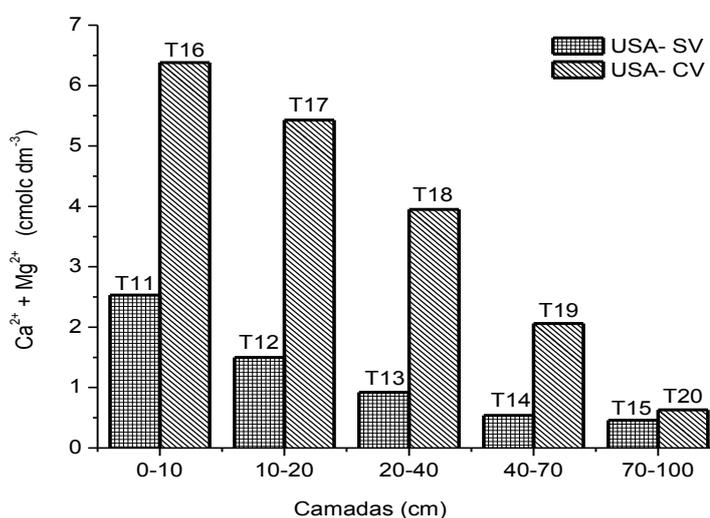
Nota-se, pelas comparações feitas entre as áreas, que as percentagens foram praticamente iguais nas três primeiras camadas (até 40 cm), enquanto nas duas finais as grandes diferenças foram atribuídas aos teores muito baixos do solo padrão, possibilitando constatar que a vinhaça percolou até a última camada do solo e contribuiu para elevar os teores de Ca²⁺ + Mg²⁺ nestas camadas (**Figura 21**).

5.2.11 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de Cálcio + Magnésio na USA

Analisando a **Figura 22** é possível observar que a distribuição desses elementos químicos, nas camadas do solo, seguiu um comportamento comum e natural da maioria dos solos, que vai diminuindo os teores de K^+ quando se vai aprofundando nas camadas do solo. Podendo-se observar que esse fenômeno ocorre com frequência nos tratamentos das duas áreas (com e sem vinhaça), onde se percebe que há um gradiente decrescente para as duas situações, nos respectivos perfis dos solos.

Ao se referir à área tratada com vinhaça, foi possível constatar pela **Tabela 21** que o tratamento T_{16} (0-10 cm) foi superior em 17,50 % ao seu subsequente T_{17} ; enquanto este que foi 37,48 % maior do que o tratamento seguinte T_{18} (20-40 cm); que, por sua vez ficou 91,75 % acima da camada de 40-70 cm (T_{19}), finalizando com a diferença de 226,98 % entre T_{19} e T_{20} .

Figura 22 - Teores de Cálcio + Magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Pelos percentuais elevados e crescentes verificados anteriormente na continuação dos tratamentos em profundidade, principalmente para a sequência de T_{16} até T_{18} ; quando se fez a comparação com os tratamentos tomados como

testemunha (T_{11}) até T_{13} , constatou-se que as diferenças para as mesmas profundidades foram de teores acima de $3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, atribuindo-se tais incrementos à contribuição proveniente da vinhaça que foi aplicada na área. Resultados semelhantes foram obtidos por Franchini et al. (1997); Franchini et al. (1999); Kaminski (2000); Carneiro et al. (2004).

Comparando às mesmas profundidades entre as duas situações (com e sem vinhaça), a **Tabela 21** mostra para os tratamentos das primeiras camadas (T_{16} vs. T_{11}) que a contribuição da vinhaça foi de 152,17 %; nas camadas de 10-20 cm (T_{17} vs. T_{12}) com 260,00 %; para os tratamentos seguintes (T_{18} vs. T_{13}) o incremento foi de 329,35 %, para (T_{19} vs. T_{14}) a contribuição foi de 281,48 % e finalizando com 36,96 % para os tratamentos das últimas camadas (T_{20} e T_{15}), mostrando grandes diferenças entre as comparações, excetuando-se, apenas, as últimas camadas. Diante dessas evidências, fica ainda mais claro que a vinhaça foi responsável pelos incrementos apresentados pelos teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ constatados nos estudos desenvolvidos no solo.

5.2.12 - Interações entre as variáveis ligadas ao Cálcio + Magnésio nas UMA e USA

A **Tabela 14** mostra pela análise estatística que houve significância, pelo teste F a 0,01 de probabilidade para todas as variáveis, ficando o efeito ambiente com o valor médio de $2,48 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ para USA, com 63,91% acima do valor de $1,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ da UMA. Acredita-se que foi a contribuição dada pela precipitação média anual da região (ver item 4.1) em favorecer a lixiviação dos nutrientes no solo, e, conseqüentemente a sua adsorção pelos minerais de argila presentes nas camadas do solo.

Com o efeito vinhaça, que teve média de $2,79 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, apresentando superioridade de 132,08 % sobre a área que não recebeu o resíduo, que por sua vez teve média de $1,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, vê-se quanto é oportuno o seu uso como substitutivo de parte da adubação mineral e também como coadjuvante para melhoria da fertilidade do solo.

A respeito das variáveis relacionadas com as camadas do solo que originaram à equação de regressão $Y = 3,777 - 0,077X + 0,00051X^2$, com um R^2 que poderá explicar 98,14 % dos eventos por meio do modelo matemático da equação proposta, indicando que os teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ decrescem quando os valores das profundidades das camadas vão aumentando (**Tabela 22**).

A interação referente ao confronto de ambiente e uso da vinhaça apresentou resposta significativa a 0,01 de probabilidade, podendo-se afirmar que a USA teve uma média de 114,69 % a mais do que a da UMA, permitindo ter a garantia de que os teores desses íons presentes no solo foram provenientes do uso da vinhaça na área (**Tabela 22**).

Tabela 22 - Análise fatorial ($2^2 \times 5$) de cálcio+magnésio ($cmol_c dm^{-3}$) dos solos nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	1,51 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	2,48 ^b	2,25 ^a	1,75 ^a	1,00 ^a	0,62 ^a	0,38 ^a
SV	1,20 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	2,79 ^b	4,88 ^b	3,30 ^b	2,75 ^b	1,75 ^b	1,25 ^b
Camadas		3,41	2,73	1,91	1,06	0,86
UMA-SV	1,25 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	1,15 ^b	2,63 ^a	1,55 ^a	1,25 ^a	1,13 ^a	0,63 ^a
UMA-CV	1,77 ^a	Interação (USA . vs. camadas)				
USA-CV	3,80 ^b	4,50 ^b	3,50 ^b	2,50 ^b	1,25 ^a	1,00 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Para interação entre ambiente e camadas do solo se constatou que houve diferença significativa pelo teste F a 0,01 de probabilidade (**Tabela 14**), ou seja, a USA foi superior nas três primeiras camadas em 71,43 % (para 0-10 cm), 125,81 % (para 10-20 cm) e 100 % (para 20-40 cm) em relação a UMA. Enquanto as demais camadas do solo não apresentaram significância entre as médias comparadas para ambiente (UMA e USA).

Para interação entre as variáveis vinhaça e camadas do solo, os teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ foram maiores nos solos com vinhaça em todas as camadas do solo, com 116,67 % para primeira, 88,57 % para segunda, 175 % para terceira, 182,26 % para quarta e 233,33 % para última camada, quando se comparou pelo teste F a 0,01 de probabilidade (**Tabela 14**).

Como os nutrientes se distribuíram em todas as camadas do solo, porém decrescendo em profundidade, apresentou um CV (%) = 27,74, considerado ruim e indicando grandes distanciamentos entre os tratamentos.

5.2.13 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de matéria orgânica do solo na UMA

O solo contém colônias de microrganismos quimioheterotróficos que possuem a habilidade de utilizar e degradar a maior parte dos compostos orgânicos sob as mais diversas condições, utilizando como fontes de energia, nitrogênio e enxofre, através da mineralização desses nutrientes (BAYER; MIELNICZUK, 2008), possibilitando, então, o consumo do material orgânico levado ao solo pelo longo período de aplicação da vinhaça, condicionando a diminuição dos teores de MOS, em todas as profundidades do solo, a níveis inferiores àqueles apresentados pelo solo que não recebeu o resíduo (**Figura 23**), estando de acordo com Resck et al. (2008) quando disseram que o solo pode desempenhar um significativo papel como fonte ou sumidouro de carbono orgânico do solo (COS), considerando que o COS, que origina a MOS, é componente principal no ciclo do carbono e é vulnerável ao impacto de atividades humanas, pois mesmo pequenas mudanças no uso do solo podem alterar as taxas de respiração e contribuir para liberação de CO_2 para atmosfera.

Os resultados expressos na **Tabela 23** são referentes a MOS e que mostram, com clareza, uma sequencia decrescente dos valores, quando se tomou como base a camada inicial do solo, de tal maneira que mesmo sendo um solo sob para exploração agrícola, apresenta valores da MOS muito baixos, porque, apesar da vinhaça conter matéria orgânica na sua composição química, então, partindo-se do princípio de que a MOS subdivide-se em compartimentos e que estes respondem às práticas convencionais de manejo (MAIA et al., 2004), os teores de MOS são

decrecendo no sentido descendente do perfil do solo, para ambas as áreas, e também, a área que recebeu vinhaça apresentou valores mais baixos do que a área sem o resíduo, em todas as camadas do solo, resultados que estão de acordo com Oliveira et al. (2013) quando dizem que a aplicação de vinhaça no solo aumentou a emissão de CO₂ quando em dois sistema de colheita: canas com palha e ateadas a fogo.

Tabela 23 - Resultados da matéria orgânica do solo (dag kg⁻¹) nas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
MOS (dag kg ⁻¹)	UMA-SV	1,62 ^{a(1)}	1,09 ^a	0,73 ^a	0,50 ^a	0,32 ^a
	UMA-CV	1,08 ^b	0,75 ^b	0,37 ^b	0,35 ^a	0,32 ^a
	USA-SV	3,02 ^a	2,25 ^a	1,60 ^a	1,00 ^a	0,70 ^a
	USA-CV	2,10 ^b	2,00 ^a	1,46 ^a	1,01 ^a	0,71 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

A elevada atividade microbiológica, no entanto, pode ser a responsável pela oxidação da MOS, sendo pela quebra de agregados favorecida pela ação antrópica, ou ainda, mediante o resultado da adição momentânea da vinhaça. Nesta ocasião, a matéria orgânica da vinhaça entra no processo de degradação e alcança o estágio fíbrico (ANJOS et al., 2008, p.76), daí a razão do seu uso prolongado não elevar os teores de MOS (MAIA et al., 2004), reduzindo-os a valores mais baixos do que os da área que não recebeu vinhaça.

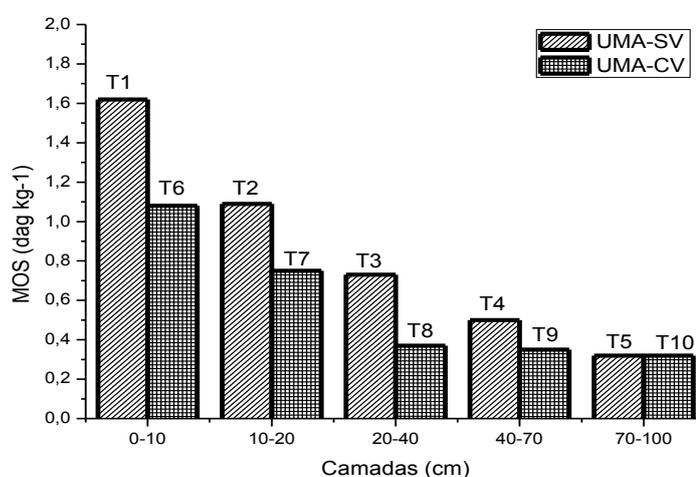
Em decorrência da MOS existente se encontrar no estágio de fração coloidal particulada, passa a ser facilmente degradada no solo (TEDESCO et al., 2008), pois o carbono depois de ser mineralizado é perdido na forma de gás carbônico (CO₂) pela ação dos microrganismos que transformam a fração da MOS mais prontamente oxidada pelo ataque de fungos e outros microrganismos que atuam na mineralização da vinhaça e de ciclos biogeoquímicos de outros elementos (SILVA, et al., 2007). Este fenômeno também foi observado por Anderson; Domsch (1978), apoud De-Polli; Guerra (2008), ao afirmarem que baseados na pronta resposta respiratória da população microbiana quando está diante de uma fonte de carbono apta à

decomposição que, ao ser adicionada ao solo em excesso, provoca o aumento da taxa respiratória, consequentemente elevando à liberação de CO_2 (OLIVEIRA et al., 2013).

Também pode ser transformado pelo processo resultante da hidrólise e posterior formação de carbonato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$, por não ser um composto estável, rapidamente se desdobra em amônia (NH_3), gás carbônico e água. Parte da NH_3 formada reage com os íons H^+ da solução do solo e com íons H^+ dissociáveis do complexo coloidal, resultando no cátion amônio (NH_4^+), que ao se ligar ao ânion carbonato (CO_3^{2-}) diminui, consequentemente, a quantidade de carbono que a vinhaça libera para o meio (CORRER; NAJM, 2011).

Analisando a **Figura 23**, pode-se observar que os resultados estão concordando com o trabalho desenvolvido por Andrioli (1986), quando o autor analisou um Latossolo que recebeu doses crescentes de vinhaça de até $1.200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sendo que estes resultados também estão em concordância com Castelazzi et al. (2004) e Barros et al. (2010); porém, Mendonça et al. (2005) afirmam que a percolação da água pelo perfil do solo possibilitou o deslocamento do carbono orgânico (que origina a MOS) para as camadas mais profundas do solo.

Figura 23 - Teores de matéria orgânica do solo (dag kg^{-1}) coletado na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Por outro lado, contrariando todas as afirmações anteriores, Canellas et al. (2003) constataram que a aplicação de vinhaça em um Cambissolo com cana-de-açúcar, no decorrer de 35 anos, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, causou aumentos significativos (Tukey, $p < 0,05$; em relação à testemunha) nos teores de carbono. Diante destes resultados, Pedrotti; Mélo Júnior. (2009-b) também contrastam como Canellas et al. (2003), que em 25 anos de aplicação do resíduo, mesmo considerando só a camada superficial (0-20 cm) como referencial para acumular maior quantidade de matéria orgânica, que sempre apresenta valores maiores que as camadas mais profundas do solo, sendo que estes resultados estão de acordo com Camilotti et al. (2010) seguindo a sequencia natural onde os níveis vão diminuindo à medida que se aprofunda no solo.

O que se pode afirmar é que na área onde não se aplicou a vinhaça, notou-se que os teores de MOS também diminuíram com o aumento da profundidade, ou seja: o tratamento T_1 foi maior do que o tratamento T_2 , enquanto este foi maior que o T_3 , e assim por diante, até chegar ao último tratamento que foi menor do que todos os anteriores. Seguindo-se o mesmo procedimento dos tratamentos que receberam a vinhaça, porém, vale salientar, que apresentando valores maiores do que estes; todavia, a razão para os tratamentos que receberam vinhaça apresentassem valores menores do que os da área sem vinhaça é motivada pelo tempo em que área se encontra recebendo a vinhaça, porque o longo tempo faz com que haja manifestações dos microrganismos para consumirem a parte da matéria orgânica proveniente da vinhaça, antes das transformações da matéria orgânica restante alcançar as características semelhantes a um estágio sáprico (ANJOS et al., 2008, p. 77).

Esse fenômeno se prende ao processo de decomposição da matéria orgânica que ocorre na formação de uma grande quantidade de substâncias necessárias para o desenvolvimento de microrganismos, de tal modo que essas substâncias, por morte desses microrganismos, serão atacadas por outros microrganismos, proporcionando uma reciclagem até um ponto em que a matéria orgânica original se transforma em compostos minerais simples, que passa a ser denominada de mineralização da matéria orgânica, ou seja, o composto libera os elementos

químicos (hidrogênio, oxigênio, carbono, nitrogênio, enxofre, etc.) constituintes da matriz MOS, e os resíduos que sobram passam por novo processo evolutivo e irão se transformar em minerais utilizáveis ou não pelos vegetais; em seguida passam a fazer parte da solução do solo e também serem adsorvidos pelas argilas (KIEJH, 1985).

As pesquisas têm demonstrado que, de maneira geral, com o cultivo continuado e desordenado das terras, há uma tendência para redução do teor de húmus no solo; fato esse que ocorre com maior intensidade em climas tropical e subtropical como os do Brasil, pois, a matéria orgânica particulada é filtrada, dissolvida e em seguida deslocada para as camadas mais profundas do solo, porém, neste trajeto não deixam de ser parcialmente degradadas por microrganismos.

5.2.14 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de matéria orgânica do solo na USA

A vinhaça - por apresentar uma razoável proporção dos seus constituintes orgânicos em uma forma que rapidamente passa para o estado solúvel, tais como glicerol e ácidos orgânicos, compostos estes de imediata degradação - quando é adicionada aos solos rapidamente sofre o processo de mineralização e libera os seus constituintes químicos solúveis para serem adsorvidos ao solo (MENDONÇA; MATOS, 2005).

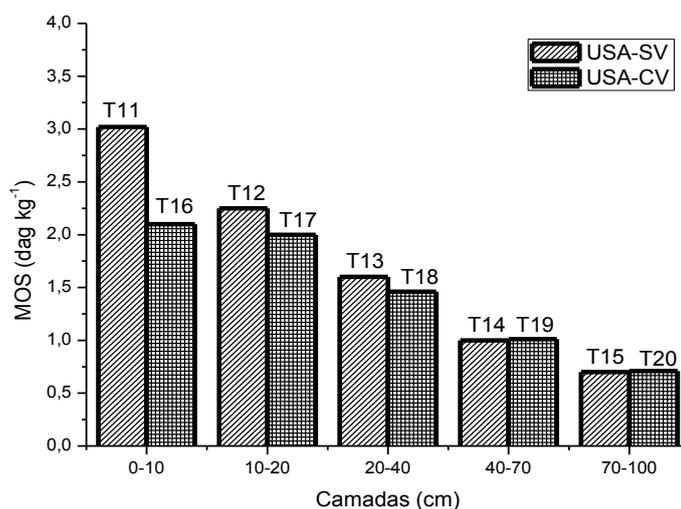
A **Tabela 23** mostra os dados referentes a MOS para as duas áreas (com e sem vinhaça). Apenas os valores referentes às profundidades que vão até 40 cm estão dentro da faixa considerada como média (BNB, 2012). As camadas referentes a todas as profundidades estão apresentadas na **Figura 24**, que mostra teores muito baixos, principalmente na área tratada com vinhaça.

Por se tratar de uma área que recebe vinhaça há muito tempo, esperava-se que os teores de MOS estivessem elevados, pelo menos acima dos valores presentes na área testemunha, ocorreu exatamente o contrário, apenas o tratamento T₁₆ com média de 2,10 dag kg⁻¹ se encontra na faixa considerada como média (MALAVOLTA et al., 1992; RAIJ, 2011; BNB, 2012), quando comparado com o

tratamento T₁₇ da camada seguinte, que por sinal faz parte da condição decrescente que os tratamentos T₁₈, T₁₉ e T₂₀ fazem parte. Esta redução é assegurada por Silva; Mendonça (2007) quando afirmam que o CO₂ e o CH₄ são formados pela decomposição/mineralização de compostos orgânicos mediante a ação dos microrganismos heterotróficos aeróbios e anaeróbios.

Mas, o que merece ser levado em consideração é o comportamento dos resultados analíticos da área sem vinhaça, que foram superiores, em todas as profundidades, aos resultados da área que recebeu o resíduo, mostrando que a vinhaça não aumentou o teor de MOS, resultados que são comprovados por Camilotto et al. (2010) - que mesmo trabalhando em um Latossolo Vermelho Distroférico argiloso, que recebeu até o quarto corte consecutivo doses elevadas de vinhaça (379 e 758 m³ ha⁻¹) – quando verificaram que não houve aumentos nos teores de MOS, mesmo com aplicações acumuladas ao longo dos quatro anos consecutivos.

Figura 24 - Teores de matéria orgânica do solo (dag kg⁻¹) coletado na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Observando-se a **Figura 24** é possível se constatar que esta condição poderá estar relacionada com a taxa de degradação sofrida pelo conteúdo de material orgânico presente na vinhaça devida ao aumento da população e atividade

microbiana no solo (SILVA et al., 2007), indicando que os compostos orgânicos presentes se degradaram no solo com muita rapidez, segundo afirma Caldeira (1977), *apud* Prezzotto (2009).

5.2.15 - Interações entre as variáveis ligadas a matéria orgânica do solo nas UMA e USA

A análise estatística correspondente às variáveis estudadas mostra que o ambiente (usinas), a vinhaça e as camadas do solo foram significativas ao nível de 0,01 de probabilidade, pelo teste F (**Tabela 14**), para as três fontes de variação referenciadas anteriormente.

A variável ambiental mostrou que a média de 1,59 g kg⁻¹ da USA foi superior em 133,82 % em relação a da UMA, com média de 0,69 dag kg⁻¹, talvez levada pela média alta da precipitação anual na região (item 4.1) contribuiu para que a MOS se deslocasse mais facilmente no solo (**Tabela 24**).

Referindo-se ao efeito do uso da vinhaça, constatou-se um fato inesperado, pois, a média 1,29 dag kg⁻¹ desta variável foi 31,64 % maior do que o da área com vinhaça, com média de 0,98 dag kg⁻¹, isto devido ao crescimento acentuado de microrganismos no solo que recebeu vinhaça, de tal maneira que elevava o consumo de carbono e diminuía a quantidade de MOS.

O efeito da variável camadas do solo teve como consequência a seguinte equação de regressão $Y = 20,572 - 0,395X + 0,00254X^2$, com um coeficiente de determinação explicando 99,13 % dos casos por meio do modelo proposto, resultados semelhantes foram encontrados por Camilotti et al. (2010), em diferentes camadas (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm) de solos com cana-de-açúcar, que receberam duas doses de vinhaça (379 e 758 m³ ha⁻¹) no 3° corte e duas (532 e 1.064 m³ ha⁻¹) no 4° corte.

A interação referente aos confrontos entre ambiente e o uso da vinhaça apresentou significância pelo teste F a p<0,01, sendo que a USA teve maiores valores do que a UMA para as duas condições de solos (com e sem vinhaça), respectivamente: 1,46 e 1,72 dag kg⁻¹ para USA e para UMA 5,10 e 8,60 dag kg⁻¹.

Referente às áreas que receberam vinhaça, a USA teve um desempenho melhor com 189,11 % superior a UMA.

Tabela 24 - Análise fatorial (2²x5) da matéria orgânica do solo (dag kg⁻¹) nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	==== Profundidades (cm) =====				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	0,68 ^a	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	1,59 ^b	2,32 ^a	1,68 ^a	1,18 ^a	0,75 ^a	0,53 ^a
SV	1,29 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	1,05 ^b	1,58 ^a	1,32 ^a	09,30 ^a	6,90 ^a	5,00 ^a
	Camadas	1,87	1,52	1,11	0,65	0,55
UMA-SV	0,86 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	1,72 ^b	12,80 ^a	8,20 ^a	5,70 ^a	4,30 ^a	3,30 ^a
UMA-CV	0,58 ^a	Interação (USA . vs. camadas)				
USA-CV	14,60 ^b	2,55 ^b	2,15 ^b	1,54 ^b	1,02 ^b	0,70 ^b

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Também se constatou que houve diferenças significativas para interação entre as variáveis usinas e camadas do solo, ao nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F, para todas as camadas no perfil do solo, com vantagens para USA que foi superior, em todas elas, com diferenças, respectivamente, de 100, 164,62, 173,33, 138,24 e 115,38 %, na sequência da primeira para a última camada do solo (**Tabela 24**).

Para interação entre as variáveis vinhaça e camadas do solo, a análise estatística mostrou, pelo teste F ao nível de 0,01 de probabilidade (**Tabela 14**), que os teores de MOS foram maiores para todos os valores das camadas dos solos sem vinhaça, diferindo do solo com vinhaça com os percentuais de 46,83, 27,27, 26,88, 8,70 e 6 %, indicando que a vinhaça interferiu bem mais nos teores de MOS nas três primeiras camadas solo que vão até 40 cm de profundidade. Este fenômeno poderá estar ligado ao aumento da biomassa microbiana que eleva o nível de CO₂ no solo, mediante as atividades proteolíticas, conforme relata Vranova et al. (2013), porém estes resultados são contrários aos encontrados por Madejón et al. (2001) que

trabalhando com vinhaça e outros compostos orgânicos, encontraram elevação no conteúdo de MOS.

Como os teores se distribuindo em todas as camadas do solo, porém decrescendo em profundidade, apresentou um CV (%) = 25,23, considerado ruim e indicando grandes distanciamentos entre os tratamentos.

5.2.16 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de carbono solúvel em água na UMA

Embora a fração dissolvida de carbono solúvel em água (CSA) represente apenas uma pequena porção da MOS, o CSA é praticamente imóvel no solo e constituinte de uma importante fonte de carbono de interesse dos microrganismos (SILVEIRA, 2005).

Na **Tabela 25** é possível observar que os teores de CSA, proveniente do solo tratado com vinhaça, foram muito altos nas três primeiras camadas, assim como foram todos os tratamentos da área que recebeu vinhaça muito acima daqueles revelados pela testemunha (**Figura 25**), podendo-se afirmar que a razão desta variação poderá estar ligada a característica arenosa do solo e talvez levado pela precipitação da região (ver item 4.1) possibilitou ao CSA ser arrastado para as camadas mais abaixo do solo, contrariando o que afirma Silveira (2005), quando diz que o CSA é praticamente imóvel no solo.

Tabela 25 - Resultados de carbono solúvel em água (mg dm^{-3}) dos solos das UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

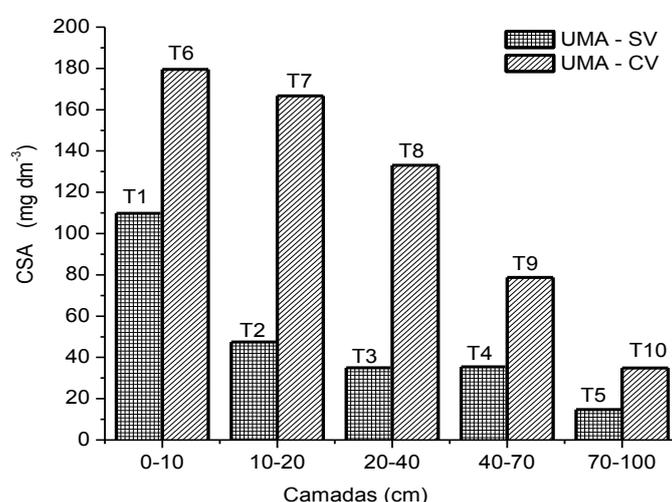
Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
CSA (mg dm^{-3})	UMA-SV	109,75 ^a	47,50 ^a	35,03 ^a	35,40 ^a	14,78 ^a
	UMA-CV	179,58 ^a	166,65 ^b	133,08 ^b	78,75 ^a	34,83 ^a
	USA-SV	103,69 ^a	58,99 ^a	46,55 ^a	21,90 ^a	3,65 ^a
	USA-CV	164,60 ^a	160,96 ^b	132,29 ^b	77,91 ^a	27,34 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Entre os tratamentos se observou que os teores decrescem com o aumento da profundidade para as duas áreas, concordando com Silva et al. (2010), quando

concluíram que nos sistemas estudados ocorreu redução dos valores de CSA na medida em que se aumentou a profundidade do solo, conforme se pode notar pela **Figura 25**, que mostra como os percentuais de CSA foram decrescentes em profundidade, tanto para a área que recebeu vinhaça quanto para a testemunha, nas diferentes camadas do solo, como se pode ver pelas comparações que foram feitas entre os tratamentos T₆ e T₇ a diferença foi de 7,76 %, 25,23 % de T₇ para T₈, 68,99 % de T₈ para T₉ e 126,10 % de T₉ para T₁₀.

Figura 25 - Teores de carbono solúvel em água (mg dm⁻³) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



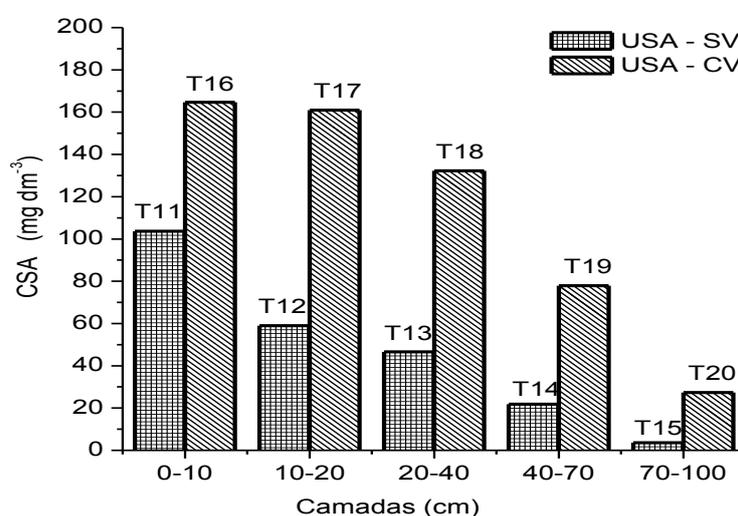
Fonte: autor, 2013.

Ao comparar os resultados dos atributos do CSA nas áreas (com e sem vinhaça) é possível se observar que as diferenças entre ambas foram muito grandes, como se pode ver: entre os tratamentos T₆ e T₁ a diferença foi de 63,62 %, entre T₇ e T₂ foi de 250,84 %, com 279,90 % entre T₈ vs. T₃, para T₉ vs. T₄ se constatou 122,46 %, finalizando com 135,66 % em relação a T₁₀ vs. T₅, mostrando que, apesar do CSA ser pouco móvel no solo, mesmo assim, as sucessivas aplicações de vinhaça ainda proporcionaram, em percentuais pequenos, o seu deslocamento no solo, quando se comparou com as respectivas camadas do solo da área testemunha (**Figura 25**).

5.2.17 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores de carbono solúvel em água na USA

Os resultados referentes às análises de CSA estão na **Tabela 25**, pode-se ver que na área onde foi aplicada a vinhaça os tratamentos apresentaram variações de 2,26 % entre as duas primeiras camadas (T₁₆ vs. T₁₇); 21,67 % entre T₁₇ e T₁₈; 69,80 % para T₁₈ e T₁₉ e 184,97 % para os últimos tratamentos T₁₉ e T₂₀. Diante dos resultados apresentados, vê-se que os três tratamentos iniciais (T₁₆, T₁₇ e T₁₈), pelas médias que apresentam, são responsáveis pela sorção dos cátions do complexo sortivo e da elevação dos valores da CTC (**Figura 28**), já que é nesta faixa de profundidade de até 40 cm onde se observa a maior concentração desses nutrientes, conforme relata Gomes (2008); quando diz que a movimentação do CSA foi maior no solo com pastagem, na camada de 0-20 cm.

Figura 26 - Teores de carbono solúvel em água (mg dm^{-3}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

O motivo do valor do CSA diminuir, com o aumento da profundidade no perfil do solo (**Figura 26**), está perfeitamente de acordo com os resultados obtidos por Gomes (2010); Silva et al. (2010), quando encontrou similaridade ao estudar os

efeitos de diferentes fontes de matéria orgânica: como vinhaça, fibra de coco, torta de filtro e bagaço de cana-de-açúcar no solo.

A **Figura 26** mostra que a aplicação de vinhaça ao solo foi responsável pelo aumento constatado em todos os valores do CSA, quando se comparou os tratamentos pertencentes às duas áreas, para as mesmas profundidades. Comprovou-se (**Tabela 25**) que a diferença percentual entre as respectivas camadas foi aumentando quando se deslocou no perfil do solo no sentido descendente; começando com uma variação de 58,74 % entre os tratamentos T₁₆ e T₁₁; 172,86 % para (T₁₇ e T₁₂); 184,19 % entre os tratamentos T₁₈ e T₁₃; as demais combinações (T₁₉ com T₁₄ e T₂₀ com T₁₅) apresentaram elevados percentuais de diferenças entre as médias, respectivamente, 255,75 e 649,04 %.

5.2.18 - Interações entre as variáveis ligadas ao carbono solúvel em água nas UMA e USA

Para as fontes vinhaça e camadas do solo se verificou que houve diferenças significativas, quando se aplicou o teste F a 0,01 de probabilidade (**Tabelas 14 e 26**), já que a variável ambiente foi NS.

Quando se referiu ao efeito vinhaça, verificou-se que houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos (SV = 47,78 mg dm⁻³ e CV = 115,80 mg dm⁻³), sendo que o efeito da vinhaça foi superior em 142,39 % àquela variável sem vinhaça. Enquanto a influência das camadas do solo foi bastante elevada, mostrando uma redução acentuada dos atributos, quando as camadas aumentavam suas profundidades, resultando em uma regressão com coeficiente linear negativo, ou seja, à medida que aumenta a profundidade diminuíam os teores de CSA, sendo a expressão representada por $Y = 135,81 - 1,42X$, a qual poderá explicar 97,87 % da variação por meio do modelo proposto.

A análise estatística dos dados mostrou que apenas a interação entre vinhaça e camadas do solo apresentou diferença significativa, quando se aplicou o teste F a probabilidade de 0,05 (**Tabela 14**).

O efeito da vinhaça contribuiu com os aumentos sobre os solos sem vinhaça, na continuação da primeira para última camada, com os seguintes percentuais de: 61,12, 207,01, 228,83, 171,76 e 235,14 %, respectivamente para todas as camadas das duas áreas, mostrando uma grande diferença entre os atributos, quando aumentavam as profundidades das camadas do solo.

Como os nutrientes se distribuíram em todas as camadas do solo, porém decrescendo em profundidade, apresentou um CV (%) = 32,23, considerado ruim e indicando grandes distanciamentos entre os tratamentos.

Tabela 26 - Análise fatorial (2²x5) do carbono solúvel em água (mg dm⁻³) dos solos nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	==== Camadas (cm) =====				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	83,80 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	79,78 ^a	106,75 ^a	53,38 ^a	40,75 ^a	28,75 ^a	9,25 ^a
SV	47,78 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	115,80 ^b	172,00 ^b	163,88 ^b	134,00 ^b	78,13 ^b	31,00 ^a
Camadas		128,70	114,49	93,16	57,62	14,97
UMA-SV	47,00 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	48,55 ^a	144,63	107,25	85,38	57,00	15,50
UMA-CV	119,05 ^a	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	112,55 ^a	134,13	110,00	89,38	49,88	24,75

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

5.2.19 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores da capacidade de troca de cátions (cmol_c dm⁻³) dos solos na UMA

A **Tabela 27** mostra na área tratada com vinhaça que apenas o primeiro tratamento T₆ foi superior ao seguinte (T₇) em 55,82 %, enquanto as demais camadas apresentaram seus tratamentos praticamente iguais, com uma pequena variação de 10% entre T₇ e o último tratamento (T₁₀). Estes resultados se comportaram de modo similar aos observados para os teores de MOS (**Tabela 23**),

mostrando uma estreita correlação entre esta e a CTC, já que a manutenção ou o aumento dos teores de matéria orgânica é fundamental na retenção dos nutrientes e na diminuição da sua lixiviação (BAYER; MIELNICZUK, 2008, p. 13).

Os resultados referentes às duas áreas (com e sem vinhaça) encontram-se na **Tabela 27**, onde se permite ver pela **Figura 27**, com exceção da primeira camada, que as demais camadas do solo da área que recebeu vinhaça apresentaram resultados menores do que as correspondentes camadas do solo que não recebeu o resíduo.

Tabela 27 - Resultados da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) dos solos nas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	UMA-SV	4,50 ^{a(1)}	4,02 ^a	3,74 ^a	3,52 ^a	3,15 ^a
	UMA-CV	5,22 ^a	3,35 ^a	3,37 ^a	3,22 ^a	3,09 ^a
	USA-SV	9,25 ^a	8,64 ^a	8,24 ^a	6,67 ^a	5,64 ^a
	USA-CV	12,12 ^a	10,24 ^a	8,31 ^a	5,98 ^a	5,28 ^a

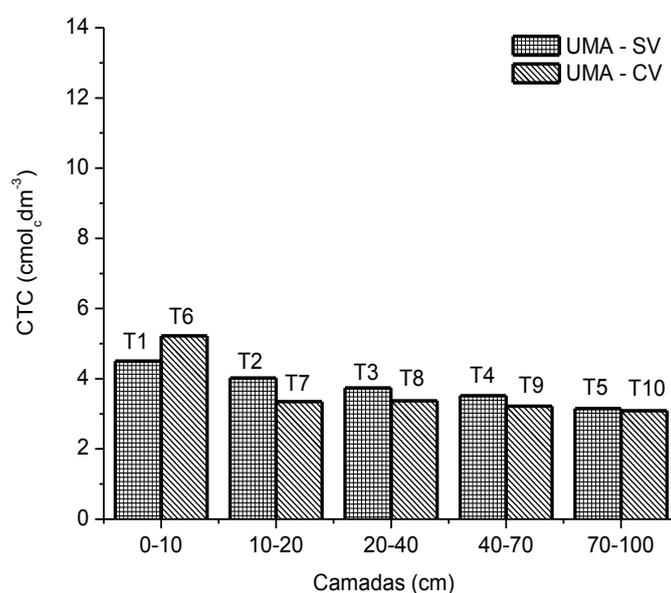
Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Por se tratar de uma área que vem recebendo vinhaça há bastante tempo, esperava-se que os teores da CTC estivessem elevados, pelo menos acima dos valores da área testemunha, mas ocorreu exatamente o contrário, porque apenas o tratamento T₆ (com vinhaça na camada de 0-10 cm) com média de 5,22 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ foi superior em 16 % ao tratamento T₁ (sem vinhaça) que apresentou média de 4,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, que por sua vez representam valores considerados como de magnitude média por Malavolta et al. (1992); Novais; Mello (2007).

Mas, o que merece ser levado em consideração é o comportamento dos resultados analíticos da área sem vinhaça, que foram superiores, em quase todas as camadas (com exceção da primeira), aos resultados da área que recebeu o resíduo (**Tabela 27**), mostrando que a vinhaça não contribuiu para aumentar os valores da CTC, resultados que são contrários aos obtidos por Barros et al. (2011), quando estudaram os efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas de solo

cultivado com cana-de-açúcar, durante um período de dez anos. Os autores constataram aumentos significantes da CTC nas três profundidades estudadas (0-15, 15-30 e 30-45 cm). Por outro lado, de acordo com Silva (2012) a CTC do solo varia na razão direta dos seus teores de MOS, assim, como a utilização de vinhaça proporcionou reduções nos teores de MOS (**Figura 23**), consequentemente esta condição contribuiu para que a CTC apresentasse valores menores do que os da área testemunha.

Figura 27 - Teores da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

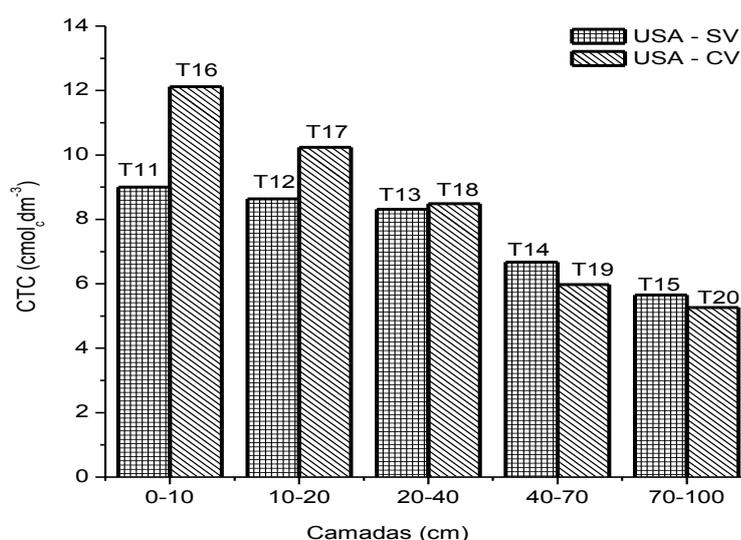
Portanto, observando-se a **Figura 27** é possível se constatar que esta condição poderá estar relacionada com a taxa de degradação sofrida pelo conteúdo de material orgânico que a vinhaça leva ao solo, indicando que os compostos orgânicos nela contidos se degradaram com muita rapidez no solo, segundo afirma Caldeira (1977) *apud* Prezotto (2009).

5.2.20 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores da capacidade de troca de cátions dos solos na USA

A área que recebeu vinhaça mostrou (**Tabela 27**) que os teores dos tratamentos foram decrescendo quando a profundidade das camadas do solo ia aumentando. Estes resultados se comportam de uma maneira semelhante a aqueles observados para os teores de MOS (**Tabela 23**), mostrando uma similaridade entre esta e a CTC, quando a MOS foi diminuindo com o aumento da profundidade, a CTC também ia diminuindo (**Figura 28**), em solos tropicais e subtropicais, a CTC da matéria orgânica pode representar um grande percentual da CTC total do solo (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Os resultados referentes à CTC para as duas áreas (com e sem vinhaça) se encontram na **Tabela 27**, onde se pode ver que todas as camadas do solo da área que recebeu vinhaça, com exceção das duas primeiras camadas superficiais (0-10 e 10-20 cm) que apresentaram resultados menores do que as correspondentes camadas do solo que não recebeu vinhaça (**Figura 28**).

Figura 28 - Teores da capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Observando-se as médias das duas áreas (com e sem vinhaça), vê-se que todas as comparações (entre pares de tratamentos) das camadas dos solos para os tratamentos T₁₆ com T₁₁, T₁₇ com T₁₂, T₁₈ com T₁₃, T₁₉ com T₁₄ e T₂₀ com T₁₅, apresentando as diferenças de 31,03, 18,52, 0,84, -10,34 e -6,38 %, como se pode observar nestes resultados, a partir da terceira comparação (0,85 %) praticamente a CTC das camadas abaixo dessa foram iguais, apresentando diferenças insignificantes e com valores negativos, isto é, os tratamentos com vinhaça foram menores.

5.2.21 - Interações entre as variáveis ligadas à capacidade de troca de cátions dos solos nas UMA e USA

A análise estatística dos dados (**Tabela 14**) revelou, para as fontes de variação ambiente (UMA e USA) e camadas do solo, que houve diferenças significativas quando se aplicou o teste F, ao nível de 0,01 de probabilidade, porém, para a fonte de variação vinhaça não houve diferença significativa.

Tabela 28 - Análise fatorial (2²x5) da capacidade de troca de cátions (cmol_c dm⁻³) dos solos nas fontes de variação: Usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	==== Profundidades (cm) =====				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	3,65 ^{a(1)}	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	8,15 ^b	6,75 ^a	6,75 ^a	5,75 ^a	5,25 ^a	4,62 ^b
SV	5,83 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	5,98 ^a	8,50 ^b	6,75 ^a	5,88 ^a	4,50 ^a	4,25 ^a
Camadas		7,57	6,80	5,85	4,81	4,46
UMA-SV	3,75 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	7,90 ^b	4,88 ^a	3,63 ^a	3,38 ^a	3,25 ^a	3,13 ^a
UMA-CV	3,55 ^a	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	8,40 ^b	10,38 ^b	9,88 ^b	8,25 ^b	6,50 ^b	5,75 ^b

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Quando se avaliou as combinações da variável ambiente (UMA e USA), verificou-se, pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade, que houve diferença

significativa entre as médias das variáveis (UMA = 3,65 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e USA = 8,15 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) das usinas, sendo que a USA foi superior em 123,29 %. Atribuindo-se esta superioridade aos níveis mais altos de argila e MOS na respectiva usina.

No tocante ao efeito da influência das camadas distribuídas no perfil do solo foi bastante significativa, mostrando uma pequena diferença dos atributos quando aumentava a profundidade da camada, sendo explicada pelo modelo matemático da equação $Y = 7,998 - 0,0877X + 0,000542X^2$ podendo este explicar 99,83% da variabilidade por meio do modelo proposto, quando se aplicou o teste F, a 0,01 de probabilidade (**Tabela 5**).

Referindo-se à interação entre as variáveis (**Tabela 28**), constatou-se que houve apenas diferença significativa, pelo teste F, a 0,01 de probabilidade, para efeitos da vinhaça e as usinas, com a USA (8,40 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) apresentando superioridade de 136,62 % sobre a UMA (3,55 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Para interação entre as variáveis ambiente e camadas do solo, observou-se que houve diferenças entre elas, ficando a USA com médias superiores (10,38, 9,88, 8,25, 6,50 e 5,75 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a UMA (4,88, 3,63, 3,38, 3,25 e 3,13 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) com os percentuais de 112,71, 172,18, 144,08, 100 e 83,71 %. Sendo atribuída esta melhoria às propriedades químicas do solo na USA (**Tabelas 15, 17, 19, 21, 23 e 25**).

O efeito da vinhaça interagindo com as camadas do solo mostrou superioridade apenas na primeira camada, com média de 8,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ contra 6,75 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ da área sem vinhaça, sendo não significativas o restante das camadas do solo, com um CV (%) = 14,92, indicando que os dados apresentaram uma média precisão.

5.2.22 - Mudanças causadas pela vinhaça na saturação de potássio na UMA

Observando-se a Tabela 29 é possível verificar que a variação dos atributos ligados à saturação de potássio na CTC (% K^+_{CTC}) se desenvolve, ao longo das camadas do solo, de modo similar ao desenvolvimento dos teores de K^+ (Tabela 19), aqui se constatando aumentos moderados entre os tratamentos da testemunha, de modo

que os teores foram aumentando com a profundidade até a penúltima camada do solo, verificando-se que foi de 61,26 % entre os tratamentos T₇ e T₆, reduzindo para 28,82 % entre T₈ e T₇; diminuindo ainda mais para 28,13 % entre T₉ e T₈.

Tabela 29 - Resultados da saturação de potássio nos solos das UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

		Profundidades (cm)				
Atributo	Áreas	0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
%K _{CTC}	UMA-SV	2,27 ^{a(1)}	2,05 ^a	1,70 ^a	1,40 ^a	1,33 ^a
	UMA-CV	2,84 ^a	4,58 ^b	5,90 ^b	7,56 ^b	6,89 ^b
	USA-SV	3,03 ^a	2,47 ^a	1,09 ^a	0,63 ^a	0,65 ^a
	USA-CV	4,91 ^b	3,78 ^b	2,75 ^b	3,30 ^b	2,89 ^b

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

Na área que recebeu vinhaça é possível constatar que apenas o tratamento T₇ (**Tabela 29**) apresentou valor dentro do intervalo (3 – 5 %) recomendado pela literatura (LOPES; GUILHERME, 2004) para o % K_{CTC} ocupar na CTC do solo.

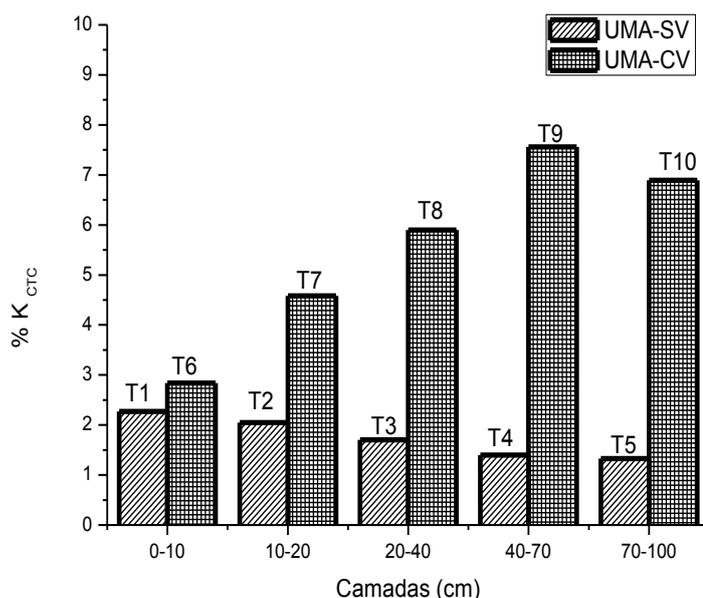
Enquanto o tratamento da primeira camada (T₆) foi inferior, os tratamentos das camadas abaixo de 20 cm (T₈, T₉ e T₁₀) apresentaram valores acima da faixa considerada como ideal para os teores do % K_{CTC} no solo (PREZOTTO, 2009), talvez pelas camadas apresentarem texturas com baixos teores de argila, principalmente nas três primeiras, podendo-se atribuir estes aumentos ao efeito do aumento dos teores de K⁺ provocado pela adição de vinhaça (**Tabela 19**) e pela sua lixiviação no solo, sobretudo mediante a contribuição dada pelos teores de areia que foram superiores a 60 dag kg⁻¹, nas respectivas camadas do solo, contribuindo para facilitar o deslocamento do % K⁺ em profundidade, ficando retido nas três últimas camadas do solo, onde a granulometria foi mais apropriada para sua retenção, graças aos teores de areia que foram reduzindo na sequência: 61,40, 55,27 e 52,58 dag kg⁻¹ (**Tabela 8**), porém os teores de argila foram aumentando em 32,32, 37,0 e 43,6 dag kg⁻¹, respectivamente para as profundidades de 20-40, 40-70 e 70-100 cm (**Tabela 10**).

Ao comparar, pela **Tabela 29**, as diferenças existentes entre os tratamentos nas duas áreas (com e sem vinhaça), obteve-se 25,11 % entre os tratamentos T₆ e

T₁, em seguida com 123,41 % entre T₇ e T₂, depois com 247,06 % para T₈ com T₃, subindo ainda mais para 440 % a diferença de T₉ para T₄ e finalmente T₁₀ sendo superior em 418,04 % ao tratamento T₅, mostrando como foi positivo o efeito da vinhaça na distribuição do % K_{CTC}, ao longo das camadas do solo.

Fazendo-se a comparação entre as áreas, observa-se a contribuição da vinhaça para que a concentração do % K_{CTC} fosse aumentando à medida que descia para as camadas mais profundas do solo (**Figura 29**), pois os tratamentos na área sem vinhaça apresentaram os valores sempre decrescentes, com o aumento da profundidade das camadas do solo.

Figura 29 - Teores da saturação de Potássio (%K_{CTC}) dos solos coletados na UMA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

5.2.23 - Mudanças causadas pela vinhaça nos teores da saturação de Potássio na USA

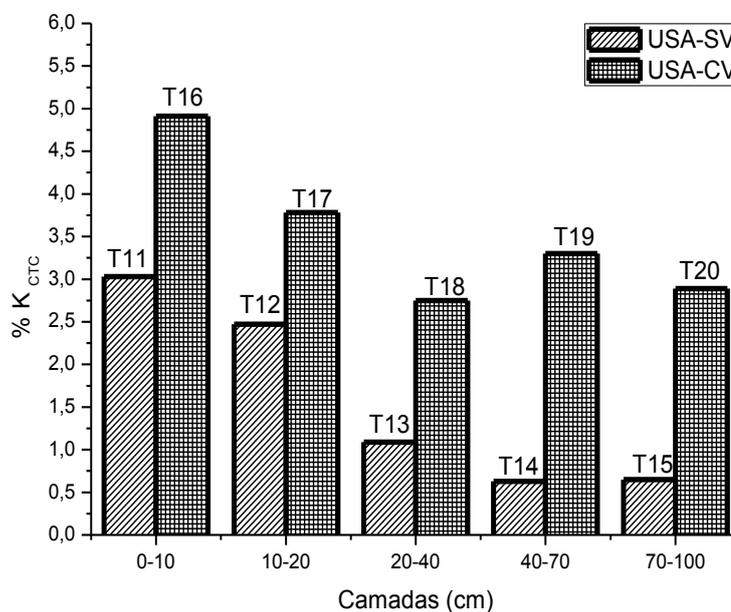
Ao fazer a avaliação na área que recebeu vinhaça, conforme se pode constatar pela **Tabela 29**, observa-se que os valores dos dois primeiros tratamentos (T₁₆ e T₁₇), com as médias de 4,91, e 3,78 %, alcançaram os índices considerados ideais, por estarem dentro da faixa, para os teores do %K_{CTC} nas respectivas

localidades, estando esses resultados de acordo com Lopes (1989), podendo-se atribuir este desempenho aos teores de argila no solo (**Tabela 10**), disponibilizando cargas negativas para adsorção do K^+ .

Os demais tratamentos (T_{18} e T_{20}) - com médias de 2,75 e 2,89 %, apesar de possuírem teores de argila elevados (**Tabela 10**) - apresentaram valores do $\%K_{CTC}$ abaixo da faixa considerada como ideal (3 - 5 %), podendo-se atribuir esta condição aos baixos teores de matéria orgânica e a pouca lixiviação do K^+ para as camadas mais profundas do solo (**Tabela 19**).

Todavia, quando se comparou os valores dos tratamentos (T_{16} com T_{11} , T_{17} com T_{12} , T_{18} com T_{13} , T_{19} com T_{14} , e T_{20} com T_{15}) entre as duas áreas, nas respectivas profundidades, obteve-se as seguintes diferenças: 62,05, 53,04, 152,09, 423,81 e 344,62 %, em favor da utilização da vinhaça. Acredita-se que houve uma tendência da uniformização do K^+ que foi originário da distribuição da vinhaça; já que os tratamentos T_{16} e T_{17} (4,91 e 3,96 %) apresentaram teores que se encontram na faixa estabelecida como aceitável para esses atributos ocuparem no $\%K_{CTC}$ (3-5 %), isto leva a afirmar que, há espaço suficiente para que o K^+ ocupe os sítios de troca das frações minerais presentes no solo, principalmente a partir da segunda camada do solo, podendo a área receber vinhaça por muito tempo, desde que a dosagem seja calculada de acordo com a CTC e seja a compatível com a retirada anual da cultura.

Figura 30 - Teores da saturação de Potássio (%K_{CTC}) dos solos coletados na USA, na profundidade de 1 metro, nas áreas com e sem vinhaça.



Fonte: autor, 2013.

Então, partindo-se da dosagem média de 100 m³ há⁻¹ de vinhaça que é utilizada anualmente na USA (item 4.2.2), tomando-se como referência a profundidade de 40 cm, tem-se um teor de 0,37 mol_c de K⁺ m⁻² (14,30 g de K⁺ m⁻²) na área, sabendo, ainda, que nessa mesma área a cultura retira 0,38 mol_c de K⁺ m⁻² (14,30 g de K⁺ m⁻²), portanto, a quantidade de K⁺ adicionada ao solo pela vinhaça é praticamente equivalente àquela que a cultura necessita para seu desenvolvimento, possibilitando, então, que a aplicação da vinhaça continuamente não proporcione risco de gerar uma saturação de cátions no solo, principalmente pelo K⁺ que é o mineral de maior expressão na composição química da vinhaça, tendo em vista que existem na profundidade abaixo de 40 cm, camadas argilo-arenosas com níveis que garantem a adsorção do K⁺, mediante a permuta pelo H⁺ presente na CTC do solo, evitando a lixiviação desses nutrientes para não contaminar o aquífero subterrâneo (UNESP, 2007; ROSETTO et al., 2008; JUNQUEIRA et al., 2009).

5.2.24 - Interações entre as variáveis ligadas à saturação de potássio nas UMA e USA

A análise estatística (**Tabela 14**) correspondente às variáveis estudadas mostra que o ambiente (usinas) e a vinhaça foram significativos ao nível de 0,01 de probabilidade, pelo teste F, enquanto as variáveis relacionadas às camadas do solo não apresentaram significância.

A variável ambiente mostrou diferença estatística entre as médias da UMA (3,85 %) e da USA (2,55 %), sendo aquela superior em 50,98 % (**Tabela 30**), talvez em virtude da topografia plana na região (item 4.1), que contribuiu para o K^+ se deslocar mais facilmente até as argilas das camadas mais profundas no solo (**Tabela 19**).

Para o efeito da vinhaça, ao aplicar o teste de Tukey a 0,05 de probabilidade, destacou-se a importância da vinhaça com média de 4,73 %, suplantando em 182,09 % à média de 1,68 % da testemunha (**Tabela 30**). Isto quer dizer que onde foi usada a vinhaça, a aplicação contribuiu para melhoria da fertilidade do solo.

A **Tabela 30** mostra ainda que para interação das variáveis ambiente e influência da vinhaça, a UMA apresentou maior média (5,85 %) com 62,50 % acima da USA (3,60 %), sendo esta diferença alcançada em virtude das características físicas do solo serem mais favoráveis, como maior teor de areia nas camadas superficiais facilitaram a lixiviação da vinhaça para a fertilização às camadas mais profundas do solo.

Para interação entre as variáveis e camadas do solo e ambiente, observou-se, pela **Tabela 30**, diferenças significativas, pelo teste de Tukey ao nível probabilidade de 0,05; ficando a USA com superioridade de 38,89% sobre a média da UMA, apenas na primeira camada do solo, enquanto nas demais camadas a UMA foi superior em 21,53, 112,77, 125,00 e 106,5 % às médias das camadas de solo da USA, reforçando ainda mais a afirmação de que o efeito do deslocamento da vinhaça para as camadas mais profundas do solo foi facilitado pela granulometria.

Tabela 30 - Análise fatorial (2²x5) da saturação de potássio dos solos nas fontes de variação: usinas (UMA e USA), vinhaça (com e sem) e camadas do solo.

Variáveis	Médias	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
UMA	3,85 ^b	Interação (SV . vs. Camadas)				
USA	2,55 ^a	2,75 ^a	2,13 ^a	1,25 ^a	1,00 ^a	1,25 ^a
SV	1,68 ^a	Interação (CV . vs. Camadas)				
CV	4,73 ^b	4,13 ^b	4,50 ^b	4,63 ^b	5,50 ^b	4,88 ^b
Camadas		3,31	3,28	3,23	3,14	3,14
UMA-SV	1,85 ^a	Interação (UMA . vs. Camadas)				
USA-SV	1,50 ^a	2,88 ^a	3,50 ^b	4,00 ^b	4,50 ^b	4,13 ^b
UMA-CV	5,85 ^b	Interação (USA . vs. Camadas)				
USA-CV	3,60 ^a	4,00 ^b	2,88 ^a	1,88 ^a	2,00 ^a	2,00 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, por Tukey ao nível de $p \leq 0,05$.

Considerando o efeito da vinhaça interagindo com as camadas do solo, observou-se a superioridade na utilização da vinhaça em todas as profundidades (**Tabela 30**), com os seguintes percentuais: 50,18, 111,27, 270,40, 450 e 290,40 %.

Com os teores se distribuindo em todas as camadas do solo, porém crescendo em profundidade, apresentou um CV (%) = 25,19, considerado ruim e indicando grandes distanciamentos entre os tratamentos.

6 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram chegar às seguintes conclusões:

6.1 - Atributos físico-químicos do solo na área com vinhaça na UMA

a) os teores de K^+ e % K_{CTC} aumentaram com o aumento da profundidade no perfil do solo;

b) os valores de pH e os teores de P, MOS e CSA diminuíram com o aumento da profundidade no perfil do solo;

c) os teores de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ e CTC diminuíram no início e depois estabilizaram com o aumento da profundidade no perfil do solo;

d) os teores de argila aumentaram e os de areia diminuíram com o aumento da profundidade no perfil do solo;

e) os teores da DS aumentaram e depois diminuíram, enquanto para a PTS aconteceu o contrário, aumentaram e depois diminuíram com o aumento da profundidade no perfil do solo.

6.2 - Atributos físico-químicos do solo na área com vinhaça na USA

f) os valores de pH e teores de P, K^+ , $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, MOS, CSA e CTC diminuíram, enquanto os da % K_{CTC} diminuíram no início e depois praticamente se estabilizaram, com o aumento da profundidade no perfil do solo;

g) os teores de argila aumentaram e os de areia diminuíram com o aumento da profundidade no perfil do solo;

h) Os teores da DS aumentaram e depois diminuíram, enquanto para a PTS houve o contrário, aumentaram e depois diminuíram com o aumento da profundidade no perfil do solo.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Os adubos e a eficiência das adubações. **ANDA**. São Paulo, 1989, 35p. (Boletim técnico, N° 3).
- ALMEIDA, J. R. O problema da vinhaça em São Paulo. **Instituto Zimotécnico da ESALQ**. Piracicaba, 1952, 24 p. (Boletim - IZ-ESALQ, 3).
- ALVES, F. Relatório do Projeto Temático FAPESP Políticas Públicas Territoriais e Auto-Sustentabilidade: Avaliação e Propostas para a Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu, São Carlos-SP. 2003. (Processo 0/02042-2).
- AMADO, T. J. C. O solo agrícola e o mercado internacional de carbono. In: (Ed) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª. ed. rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole, 2008. p. 625 - 86. 636p.:il.
- ANDRIOLI, I. **Efeitos da vinhaça em algumas propriedades químicas e físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro textura média**. 1986. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - ESALQ/USP, Piracicaba, 1986.
- ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. Matéria orgânica e pedogênese. In: (eds) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª. ed. rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole, 2008. p. 65 - 86. 654 p.:il.
- AZEREDO, D. F.; MANHÃES, M. S. Adubação orgânica. In: Orlando Filho, J. (ed.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983, p. 227 - 264, 368 p.
- BARROS, R. P. de. Estudo dos efeitos da aplicação da vinhaça na qualidade de solos em cultivos da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L), e uso de indicadores no sistema de produção. NEREN – Núcleo de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Sergipe. Aracajú, p. 1 - 9, 2011.

BARROS, R. P. et al. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária**, Goiania, v. 40, n. 3, p. 341- 346, jul / set. 2010.

BARTLETT, R. J.; ROSS, D. S. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solution. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 52, p. 1191-1192. 1988.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: (Ed) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2^a.ed. rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrôpole, 2008. p. 87-99. 654 p.:il.

BEBÉ, F. V. **Avaliação de solos sob diferentes períodos de fertirrigação com vinhaça e alterações na qualidade do efluente**. 2007. 39p. (Mestrado em Agronomia – Água e Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007.

BEBÉ, F. V. et al. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**. UEAE/UFCG. Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 781-787. 2009.

BNB - BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. **Agenda do Produtor Rural**. 2012. 275p.

BONINI, M. de A. **Cultivo heterotrófico de Aphanothece microscópica Nägeli e Chlorella vulgaris em diferentes fontes de carbono e vinhaça**. 2012. 96 p. Dissertação (Mestrado Ciências Agrárias), Univ. Fed. de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias. Araras, 2012.

BRETT, A. M. O.; BRETT, C. M. A. **ELETROQUÍMICA princípios, métodos e aplicações**. Livraria Almedina, Dep. de Química, Univ. de Coimbra, Portugal. 1996. 471p.

- BRITO, F. L. et al. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**. DEAg/UFCG, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 318-323, 2007.
- CAMARGO, F. A. O et al. Nitrogênio orgânico do solo. In: (Ed) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª. ed. rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole, 2008. p. 87-99. 654 p.: il.
- CAMARGO, O. A; VALADARES, J. M. A. da S.; GERALDI, R. N. Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo. Sec. de Agric. e Abast. - Governo do Estado de São Paulo – Coord. da Pesq. Agrop. - Instituto de Campinas, Campinas, 1983. 30 p. (Boletim Técnico n° 76).
- CAMILOTTI, F. et al. Atributos físicos de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 738-747, set./dez. 2006.
- CAMILOTTI, F. et al. Grau de flocculação e condutividade hidráulica de um solo tratado com lodo de esgoto e vinhaça. **Centro de tecnologia: FATEC-JB**, Jaboticabal, v.1, n. 1, p. 13-20, 2010.
- CANELLAS, L. P. et al. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação de palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. 2007. p. 375-470, 1017 p.: il. (algumas coloridas); 26cm.
- CARNEIRO, C. E. A. et al. Chemical alterations in the soil induced by the superficial application of straw or sugar-cane, limestone and vinasse. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 25, n. 4, p. 265-272, out/dez. 2004.

CARNEIRO, E.; SILVA, M. Biogás de vinhaça - Potenciais e oportunidades. **Revista CANAMIX**, ed. Thiago Gallo, Ribeirão Preto, a.4, n.39, ago. 2011.

CASTELLAZZI, M. S.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. Distribution of microbial biomass down soil profiles under regenerating woodland. **Soil Biol. Biochem.**, 36:1485-1489, 2004.

CETESB. Normativa 4.231 de 2005.

CONAB — Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar de 2012, 19 pp. Disponível em: <www.conab.gov.br/cana-de-açúcar>.

CORRER, L. D.; NAJM, M. H. Volatilização de nitrogênio proveniente da aplicação da mistura da vinhaça concentrada com adubos nitrogenados na nutrição do canavial colhidos sem queima – Fac. de Tecn. “Paulo Souza”. Piracicaba, 2011, 38p. (Trabalho de graduação).

CRUZ, R. L.; RIGHETTO, A. M.; NOGUEIRA, M. A. Experimental investigation of soil and groundwater impacts caused by vinasse disposal. **International Seminar of Pollution, Protection and Control of Ground Water**, Porto Alegre, Brazil, p. 66-74. 1990.

CUNHA, R. C. A. et al. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science and Technology**, v. 19, n. 8, p.155-165, 1981.

DECHEN, A. R. D.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1ª Ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. p. 91-132, 2007. 1017 p.: il. (algumas coloridas); 26cm.

DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análises químicas do solo: metodologia. Viçosa, UFV, n. 29. 1981. 17 p.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. Carbono, nitrogênio e fósforo da biomassa microbiana do solo. In: (Ed.) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria**

orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ª.ed.rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole, p. 87-99, 2008. 654 p.: il.

DIAS, JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. **Soc. Bras. de Ciência do Solo.** Viçosa, v. 1, p. 55-94, 2000.

EMBRAPA – Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. Manual de métodos de análises de solos. Rio de Janeiro, 1979. n.p.

EMBRAPA SOLOS – ZONEAMENTO AGROECOLÓGICO DO ESTADO DE ALAGOAS. Min. da Agr. Pec. e Abastecimento - UEP RECIFE. **Mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos.** Secretaria de Estado de Agricultura e do Desenvolvimento Agrário de Alagoas. Modificado em dez/2010.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. de; SANTOS, F. C. dos. POTÁSSIO. In: (Ed.) NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo.** 1ª Ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. p. 551-594, 2007. 1017p.:il. (algumas coloridas); 26cm.

FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **Glossário de ciência do solo.** Universidade Federal de Viçosa - Departamento de solos. Viçosa: U.F.V., 1992. 142 p.:il.

FONTES, L. E. F. Fertirrigação da cana-de-açúcar com vinhaça. Seminário apresentado no curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1987. 18 p.

FRANCHINI, J. C.; MIYAZAWA, M.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 32, n.12, p.1309-1315, 1997.

FRANCHINI, J. C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 34, n. 12, p. 2267-2276, 1999.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. Vinhaça de cana-de-açúcar. **Agropecuária,** Guaíba, 2000. 203 p.

GARGANTINI, H. et al. Levantamento de fertilidade dos solos do Estado de São Paulo. **Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, 1970.

GLÓRIA, N. A. da; ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. **Planalsucar**, Piracicaba, v.5, p.5-38, 1983.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. Livraria Nobel. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 1978. 430 p.

GOMES, T. C. de A. Fatores que afetam a lixiviação de carbono e nitrogênio em solo submetido à adição de composto orgânico. Recife: UFRPE-PPGCS, 2008, 27 p. : il.

ICIDCA – INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGAÇÕES DOS DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**: diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos, energia. Brasília, 1999, 472 p.

ICIDCA – INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGAÇÕES DOS DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Fichas técnicas dos produtos**. Havana-Cuba. 2004.

JACOMINE, P. K. T. et al. **Levantamento exploratório** – reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Recife, EMBRAPA – Centro de Pesquisas Pedológicas, SUDENE (Divisão de recursos renováveis, 5), 1975, 531 p. (Bol. técnico, nº 35)

JUNQUEIRA, C. de A. R. et al. Identificação do potencial de contaminação de aquíferos livres por vinhaça na bacia do Ribeirão do Pântano, **Ver. Bras. de Geo-Ciências**. Descalvado, SP, Brasil. v.39(3): p.507-518, set 2009.

KAMINSKI, J. Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto. **Soc. Bras. de Ciência do solo**, Pelotas, 2000, 123 p.

KIELH, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba, ed. Agronômica Ceres Ltda, 1985, 492 p.

KIELH, E.J. **Manual de edafologia**: relação solo-planta. São Paulo, ed. Ceres, 1979, 264p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Soc. Bras. de Ciência do Solo**, v. 26, n 4. p. 857-867, 2002.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. .F. Manejo sustentável dos solos dos cerrados. In: (Eds) KLUTHCOUSKI, J., STONE, L. .F., AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. P. 59-104. 570 p.: il.

LEAL, M. A. A.; DE-POLLI, H. Modelagem da matéria orgânica do solo. In: (Ed.) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª.ed.rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole, 2008. p.293-321. 654 p.: il.

LEITE, L. F. C. et al. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 821-832, 2003.

LIMA, C. C. de. **Dinâmica de carbono, características químicas do solo, sistema radicular e produção do feijoeiro em resposta à adição de composto à base de dejetos de suínos**. 1996. 114 p. Dissertação (Mestrado em solo e nutrição de plantas) - UFV, Viçosa, 1996.

LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. São Paulo, ANDA/POTAFOS, 1989. 153 p.: il.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Interpretação de análise do solo - conceitos e aplicações. **Associação Nacional para Difusão de Adubos**. São Paulo, 2004, rev. (Boletim Técnico n° 2).

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

MACHADO, A. T. et al. Alterações nos atributos químicos do solo por aplicação de dejetos suíno e vinhaça. In: VII EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica

Cesumar. 7, 2011, Maringá. **Anais eletrônico**. Centro Universitário de Maringá: ed. CESUMAR, 2011, ISBN 978-85-8084-055-1.

MADEJÓN, E. et al. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 84, n.1, p.55-65, 2001.

MAIA, S. M. F. et al. **Sistemas Agroflorestais no Trópico Semi-Árido Cearense – Solo e Água**: Aspectos de Uso e Manejo - com ênfase no semi-árido nordestino. Univ. Fed. do Ceará, Univ. Fed. de Viçosa, ESALQ e CAPES, 2004. 458 p.

MALAVOLTA, E. ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. **CENA/USP**. Piracicaba, 1992. 124 p.

MARIA, R. A. **Análise da substituição da motobomba a diesel por motobomba elétrica no transporte de vinhaça para fertirrigação**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia – PRODETEC. Curitiba, 2011.

MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Calibration of extractable phosphorus in soils for sugarcane in Alagoas, Brasil. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 16, São Paulo, 1977. **Proceedings**, São Paulo, Impress, v. 2, p 1283-92. 1978.

MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. D & M Gráfica e Editora Ltda. Viçosa, 107p. 2005.

MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: (ed.) EGON JOSÉ MEURER. **Fundamentos de química do solo**. 2ª ed. rev. e amp. Porto Alegre: Gênese. 2004. p. 101-129, 290 p.: il.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: (ed.) EGON JOSÉ MEURER. **Fundamentos de química do solo**. 2ª ed. rev. e amp. Porto Alegre: Gênese. 2004. p. 131-176, 290 p.: il.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: (Ed.) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª.ed.rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole. 2008. p.1-7, 654 p.:il.

NEVES, M. C. P.; LIMA, I. T.; DOBEREINER, J. Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 2, p.131-136, 1983.

NICOCELLI, L. M. et al. Sorção de potássio em amostras de solos submetidas à aplicação de vinhaça. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.16, n.7, p.754-760, 2012.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V de. RELAÇÃO SOLO-PLANTA. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1ª Ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. 2007. p.133-204, 1017p.:il. (algumas coloridas); 26cm.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1ª Ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. 2007. p. 471-550, 1017p.:il. (algumas coloridas); 26cm.

NUNES, M. R.; VELLOSO, A. C. X.; LEAL, J. R. Efeitos da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. **Pesquisa Agrop. Bras.** Brasília, 16:165-170, 1981.

OLIVEIRA, B. G. de et al. Soil greenhouse gás fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **ELSEVIER. Geoderma**. 200-201, 77-84. 2013.

OLIVEIRA, G. C. de et al. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agrop. Bras.** Brasília, v. 38, n 2, p.291-299. 2003.

ORLANDO F°, J.; SILVA, G. M. A; LEME, E. J. A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: (Ed.) ORLANDO FILHO, J., **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR. 1983. p. 227-264, 368 p.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Soc. Bras. de Ciência do Solo**, Campinas, n. 35, p.403-415. 2011.

PAULINO, J. et al. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. **Revista Bras. de Eng. e Amb.** Campina Grande, v.15, n.3, p.244-249. 2010.

PEDROTTI, A.; MELLO JR., A. V. **A compactação do solo e a sua influência na sustentabilidade dos agroecossistemas**. Editora da UFS. São Cristovão. 2009a. 62 p.

_____. **AVANÇOS EM CIÊNCIA DO SOLO: A Física do Solo na Produção Agrícola e Qualidade Ambiental**. Editora da UFS. São Cristovão. 2009b. 209 p.

PEDROTTI, A. et al. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 03, p. 521-529, 2001.

PRADO, H. do et al. Solos e ambientes de produção. In: (Ed.) DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDEL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Gov. do Estado de São Paulo – Secr. de Agric. e Abast. – Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios. **Instituto Agrônomo**. Campinas, p.179-204, 2008. 882 p. il.

PREZOTTO, P. **Biodegradação do carbono orgânico, mineralização do nitrogênio e alterações química em solos tratados com vinhaça**. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Topical e Subtropical) - Instituto Agrônomo – Curso de Pós-Graduação em Agr. Top. e Subtrop. Campinas, fev 2009.

RAIJ, B. van. Interpretação da análise de terra. **Instituto Agrônomo de Camp.** Campinas, 1975. 8 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute. Piracicaba, 2011. 420 p.: il.

RAIJ, B. van et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Inst. Agron. de Camp.** Campinas, 1995. 107p. (Boletim Técnico, 100).

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **SOLO, PLANTA E ATMOSFERA**: Conceitos, Processos e Aplicações. Manole, São Paulo, 2004. 478 p.

REINERT, D. J. et al. Qualidade física do solo. In: **XVI Reunião Bras. de Manejo e Cons. do Solo e da Água**. 16, 2006, Aracajú. **Anais.**, Viçosa: Soc. Bras. de Ciência do Solo, 2006. Disponível em <CD ROM>.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIQUEIREDO, C. C. de. Dinâmica da Matéria orgânica no Cerrado. In: (Ed.) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ª ed. rev. atual e amp. - Porto Alegre, Gráfica Metrópole. 2008. p.87-99, 654 p.:il.

RIBEIRO, B. T. et al. Cargas superficiais da fração argila de solos influenciadas pela vinhaça e fósforo. **Química Nova**, v.34, n.1, p.5-10. 2011.

RODELLA, A. A.; ZAMBELLO JR. E.; ORLANDO FILHO, J. Calibração de análise de fósforo e potássio no solo em cana-de-açúcar: 2ª aproximação. **Saccharum**, São Paulo, v.28, n.1, p.39-42. 1983.

ROSA, M. E. C. et al. Formas de carbono em Latossolo Vermelho Eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Rev. Bras. de Ciência do solo**. Viçosa, v.27, p.911-923, 2003.

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

ROSSETTO, R. et al. POTÁSSIO. In: (Ed.) DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDEL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Gov. do Estado de São Paulo – Secr. de Agric. e Abast. – Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios. **Instituto Agrônômico**. Campinas. 2008. p.289-312, 882 p.: il.

SANTOS, D. R. et al. Fósforo orgânico do solo. In: (Ed.) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª.ed.rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole. 2008. p.101-111, 654 p.:il.

SANTOS, J. R. **Produção de grãos, estabilidade de agregados e frações do fósforo e da matéria orgânica do solo em função do manejo e da aplicação de calcário, gesso e vinhaça**. 2000. 120 p. Tese (Doutorado em agricultura) - Univ. Est. "Júlio de Mesquita Filho" – Fac. de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Fev 2000.

SANTOS, J. D. dos et al. Development of a vinasse nutritive solution for hydroponics. *Journal of Environmental Management*. ELSEVIER, v.114, p.8-12. 2013.

SILMARA, R. B. **Avaliação química de solos tratados com vinhaça e cultivados com alfafa**. 2008. 108 p. Tese (Doutorado) - Univ. Fed. de São Carlos - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Dep. de química- prog. de Pós-Graduação em química. São Carlos, 2008, 108 p.

SILVA, A. F. T. da et al. Carbono orgânico e carbono solúvel em água em Latossolo do sudoeste piauiense sob diferentes tempos de cultivo. XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO- Solo nos Biomas Brasileiro; Sustentabilidade e Mudanças Climáticas, 33, 2010, Uberlândia. **Resumo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

SILVA, A. da. **Vinhaça concentrada de cana-de-açúcar: monitoramento das propriedades químicas do solo e mineralização líquida de nitrogênio**. 2012. 115 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura e no Ambiente) - Universidade de São Paulo – Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Programa de Pós-graduação em Ciência, Piracicaba, 2012.

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

SILVA, A. J. N. da. **Alteração física e químicas de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. 2003. Tese (Doutorado

em Ciência do Solo) - Univ. Fed. do Rio Grande do Sul – Faculdade de Agronomia – Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Porto Alegre, 2003.

SILVA, C. A. **Efeito da aplicação de vinhaça, por sulcos de infiltração, no solo e na cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1983. 63 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Univ. Fed. da Paraíba, Campina Grande, 1983.

SILVA, I. R. da; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. 1ª Ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. 2007. p. 275-374, 1017p.:il. (alg. coloridas); 26cm.

SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso da vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, DEAg/UFCG, v.11, n.1, p.108-114. 2007.

SILVA, R. B. et al. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**. Viçosa, v.27, n.6, 2003.

SILVEIRA, M. L. A. Dissolved organic carbon and bioavailability of n and p as indicators of soil quality. **Sci. Agric**. Piracicaba, Braz., v.62, n.5, p.502-508, sept./oct. 2005.

Sindaçúcar-AL, <<http://www.sindacucar-al.com.br>>, acesso em 30/03/2003.

SOOBADAR, A.; KWONG, K. F. R. N. K. Impact of high rates of vinasse on some pertinent soil characteristics and on sugarcane yield in Mauritius. **Journal of Sustainable Agriculture**, London. 36:1, 36-53. 2012.

SOUSA, D. M. G.; CARVALHO, L. J. C. B.; MIRANDA, L. N. Correção da acidez do solo. In: GOEDERT, W.J. Solos dos Cerrados: Tecnologias e Estratégias de Manejo. Planaltina. **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**, São Paulo, Nobel, p. 99-127. 1985.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: (Ed.) NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. 1ª Ed. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. 2007. p. 205-274, 1017 p.: il (alg. coloridas); 26cm.

SPARKS, D. L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMMNER, M.E., ed; **Handbook of soil science**. Boca Raton, CRC Press, 2000, Section D. p. D48.

STEVENSON, F. J. Humus chemistry. **John Wiley & Sons**. 2ª.ed, New York. 1994. 496 p.

TEDESCO, M. J. et al. Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente. In: (eds) SANTOS, G. de A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2ª.ed.rev. atual e amp. - Porto Alegre: Gráfica Metrópole, 2008. p.113-135, 2008, 654 p.

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – Campus de Jaboticabal – Fac. de Ciências Agrárias e Veterinária – Dep. de Tecn. Termo de Referência para o Workshop Tecnológico Vinhaça, set 2007, 14 p.

ÚNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. 2007.

ÚNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. 2012.

UYEDA, C. A. **Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial**. 2009. 66 p. Tese (Doutorado) - Escola Sup. de Agric. “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009, 66p.

VASCONCELOS, J. N. de. Estudo sobre a composição química da vinhaça de diferentes procedências no Estado de Alagoas. **Saccharum**, São Paulo, 4 (29):40-48. Nov/Dez. 1983.

VASCONCELOS, R. F. B. de et al. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo Destrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Rev. Bras. de Ciência do solo**, Viçosa, 36: 525-536. 2012.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil Till. Res.**, 2006. (in press).

VEIGA, M. da. Metodologia para coleta de amostras e análises físicas do solo. Florianópolis: **Epagri**, 2011. 52 p.

VETTORI, L. Métodos de análises de solos. R. de Janeiro, 1969, 24 p. (Bol. Téc. 7).

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. Calagem na cana-de-açúcar. **Serrana Fertilizantes**. São Paulo. 2011, 15 p. (Boletim Técnico).

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, Magnésio e enxofre. In: (ed.) FERNANDES, M. S. **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa; Soc. Bras. de Ciência do Solo. 2006. p.299-325. 432 p.: il. Algumas col.; 26 cm.

VRANOVA, V.; REJSEK, K.; FORMANEK, P. Protelolytic activity in soil. **Applied Soil Ecology**. Department of Geology and soil Science, Mendel University in Brno, Zemedelska, Czech Republic. . n. 70. p 23-32. 2013.

ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Adubação da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. **Planalsucar**, v.3, p.5-26, 1981.

ZOLIN, C. A. et al. Estudo exploratório de uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, UAEA/UFCG. v.15, n.1, p.22-28, 2011.

GLOSSÁRIO

%K_{CTC} – é o percentual de cargas ocupado pela adsorção de K⁺ na capacidade de troca de cátions (CTC). Varia de solo para solo, na faixa de 3-5%, ou seja, os solos de textura mais grossa (arenosos) têm a %K_{CTC} igual a 3%, enquanto os solos de textura mais finas (argilosos) têm a %K_{CTC} igual a 5%.

ACIDEZ ATIVA - atividade devida à concentração de íons hidrogênio que se encontram livres ou dissociados na solução.

ACIDEZ POTENCIAL – a quantidade de íons hidrogênio trocáveis em um solo que podem ser liberados ou se tornarem ativos na solução, ou seja, aquela acidez que envolve não apenas os íons hidrogênio livres, mas, também, aqueles que ainda estão associados nas moléculas e que poderão se dissorciar.

ANTRÓPICO – camada superficial do solo que apresenta características semelhantes ao horizonte A chernozêmico, em outras palavras: é a camada superficial, que o homem pisa e os implementos agrícolas a modificam com o manejo de arar, gradear, sulcar, dentre outras práticas agrícolas.

ANTROPOGÊNICA – é o fenômeno que ocorre na camada superficial do solo formado pela influência da atividade humana, a partir de contínuos e prolongados cultivos e tratos culturais.

ÁREA DE SACRIFÍCIO – área muito próxima à destilaria que sofria com a deposição de grande quantidade de vinhaça, tornando o solo improdutivo e possivelmente com risco de poluir o aquífero subterrâneo.

ARGISSOLO – Unidade que agrupa os solos com horizonte B textural (substitui a antiga denominação que lhe era imputada, quando era classificado como Podzólico). É um grupo de solos que ocupa áreas mais rejuvenescidas. É, por definição, distrófico, necessitando de referência quando se apresenta eutrófico.

CEROSIDADE – é um filme de argila ou película iluvial que reveste unidades estruturais do solo. Caracteriza-se por um revestimento de argilas cristalinas

aumino-silicatadas, orientadas ou não, revestindo agregados e/ou poros. Confere às superfícies que reveste, um aspecto lustroso e um brilho graxo; quando bem desenvolvida, torna-se facilmente perceptível.

CHERNOZÊMICO – horizonte A escuro, espesso, com presença de cátions bivalentes, especialmente o cálcio e o magnésio. Entre outras características, deve apresentar alta saturação de bases (maior que 50%) e fósforo assimilável inferior a 110 mg kg^{-1} , quando analisado em ácido cítrico a 1%.

COLOÍDE – componente orgânico principal que origina o estado coloidal, que são sistemas detentores de duas fases: uma das quais, a fase dispersa que é formada por material em estado de extrema subdivisão e está imersa em outra, a fase dispersora. As partículas da fase dispersa, colóides e/ou micelas, apresentam como características principais: a formação de cargas elétricas de superfície (com área superficial ou superfície específica elevada), movimento browniano e dispersão da luz (o efeito Tyndall).

COMPLEXO SORTIVO – é o grupo de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , Al^{3+}) que passa pelo mecanismo da sorção no solo.

FÍBRICO – representa o estágio de menor grau de transformação da matéria orgânica no solo, com a maior quantidade de fibras presentes na matriz orgânica final. Estão presentes quantidades apreciáveis de fibras, bem preservadas e facilmente identificáveis quanto à origem botânica. O material de solo fíbrico é caracterizado pela reduzida densidade do solo e elevados teores de água retidos quando o solo está saturado.

HORIZONTE B TEXTURAL – é o horizonte subsuperficial onde há incremento de argila, oriunda ou não do horizonte A. É resultante de acumulação ou concentração de argila decorrente de processos de iluviação e/ou formação “in situ” e/ou herdado do material de origem. Tem relação textural B/A (% de argila do B dividido pela % de argila do A) usualmente alta (acima de 1,50).

HÚMUS – é o estágio em que o material orgânico está bem decomposto, transformado por meio microbiológico, encontrando-se no solo em estado coloidal.

Normalmente tem coloração escura. Os principais tipos de húmus, segundo Duchaufour, são: 1 - Mull Cálculo, 2- Mull Florestal, 3 - Moder, 4 – Mor, 5 – Turfa Cálculo, 6 – Turfa ácida, 7 Anmoor.

LIXIVIAÇÃO – processo de remoção, que ocorre no solo, de sais simples e de outras substâncias solúveis em água, com o deslocamento desses componentes pela água de drenagem para fora do sistema.

MELASSIGÊNICO – é um fenômeno que acontece no ato da fabricação do açúcar, proveniente da cana-de-açúcar que se desenvolveu em um solo com muito potássio (solo que recebeu altas doses de vinhaça), dificultando a cristalização.

MOSTO - por definição são todos os líquidos suscetíveis de sofrer fermentação, passando para o estágio de vinho que é o líquido já fermentado, que depois de destilado o resíduo origina a vinhaça.

SÁPRICO – representa o estágio de maior grau de transformação da matéria orgânica no solo, com a menor quantidade de fibras na matriz orgânica final.

SOLUÇÃO DO SOLO - representa a fase líquida aquosa do solo e seus solutos, que consiste em íons (ânions e cátions) dissociados das superfícies das partículas e de outros materiais solúveis.

SORÇÃO – compreendo os diversos mecanismos de retenção de íons e moléculas pela fase sólida.

TANQUE PULMÃO – reservatório (sem revestimento) feito no solo (próximo à destilaria) que serve para receber a vinhaça que está sendo produzida na destilaria e em seguida é bombeada para outro reservatório, fora da área industrial, para ser destinada aos sistemas de aplicação no campo.

VINHAÇA – resíduo líquido oriundo da destilação fracionada do vinho, proveniente do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar ou da diluição do melaço (com água ou com caldo), para obtenção do etanol.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Sugestões.

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem contribuir com o setor sucroalcooleiro com as seguintes sugestões:

7.1 - a qualidade (íons e matéria orgânica) e a quantidade (dosagem em torno de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) de vinhaça aplicada como fertirrigação pelas UMA e USA não causam prejuízos ambientais e proporcionaram benéficos para as plantas;

7.2 - usar a vinhaça como fertirrigação, desde que se preocupe as seguintes precauções: a) analisar o solo para saber os teores de K^+ , CTC e $\% \text{K}^+_{\text{CTC}}$; b) analisar a vinhaça para saber a concentração em K^+ , pois são medidas indispensáveis para calcular a dosagem adequada para fornecer a quantidade total de K^+ que o solo suporta (limite máximo permitido para a $\% \text{K}^+_{\text{CTC}}$ do solo), para poder atender ao consumo anual da cultura;

7.3 - antes de qualquer avaliação ligada ao uso da vinhaça, é conveniente levar em consideração que a sua utilização não é simplesmente um modo de se livrar do resíduo como se fosse um problema, mas o seu uso como um meio para melhorar as propriedades físico-químicas do solo, sem causar prejuízo ambiental;

7.4 - os nutrientes presentes na vinhaça são provenientes da cana-de-açúcar (depois de passar pelo processo de industrialização), e esta ao absorver tais nutrientes do solo e passar pelo citado processo, transfere-os para a vinhaça, portanto, não há riscos de conter elementos químicos tóxicos ou indesejáveis, tão somente contem aqueles indispensáveis para o desenvolvimento da planta (macro e micronutrientes), já que o ciclo é fechado (solo-planta-vinhaça-solo);

7.5 - o volume de vinhaça produzido nessas unidades (UMA e USA) não gera excedente, pois, fazendo-se uma comparação entre a quantidade de vinhaça produzida na safra e a o volume necessário para aplicar nas suas áreas agrícolas, vê-se que toda vinhaça produzida é insuficiente para atender às necessidades de fertirrigação dessas áreas.

APÊNDICE B - Resultados de $H^+ + Al^{3+}$ ($cmol_c dm^{-3}$) dos solos das usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
$H^+ + Al^{3+}$ ($cmol_c dm^{-3}$)	UMA-SV	2,37 ^{a(1)}	1,94 ^a	2,61 ^a	2,87 ^a	2,57 ^a
	UMA-CV	2,23 ^a	1,74 ^a	1,69 ^a	1,35 ^b	1,36 ^a
	USA-SV	6,40 ^a	7,92 ^a	7,27 ^a	6,05 ^a	5,12 ^a
	USA-CV	5,08 ^a	4,38 ^a	4,02 ^a	3,69 ^a	4,46 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.

APÊNDICE C - Resultados de Na^+ ($mg dm^{-3}$) dos solos das usinas UMA e USA, coletados até 1 metro de profundidade, nas áreas com e sem vinhaça.

Atributo	Áreas	Profundidades (cm)				
		0-10	10-20	20-40	40-70	70-100
Na^+ ($mg dm^{-3}$)	UMA-SV	0,05 ^{a(1)}	0,04 ^a	0,03 ^a	0,03 ^a	0,03 ^a
	UMA-CV	0,08 ^a	0,06 ^a	0,06 ^a	0,06 ^b	0,08 ^a
	USA-SV	0,04 ^a	0,06 ^a	0,03 ^a	0,04 ^a	0,02 ^a
	USA-CV	0,07 ^a	0,04 ^a	0,04 ^a	0,03 ^a	0,04 ^a

Fonte: autor, 2013. ⁽¹⁾ Médias das mesmas letras, na coluna (para cada usina), não diferem entre si, pelo teste de Tukey a $p \leq 0,05$. Análises feitas no LAPA/CECA/UFAL. Média de 4 repetições.