

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM ARGISSOLO AMARELO COESO
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO COM CANA-DE-AÇÚCAR**

APOLINO JOSÉ NOGUEIRA DA SILVA
Engenheiro Agrônomo (UFRPE)
Mestre em Agronomia (UFRPE)

Tese apresentada como um dos requisitos para obtenção
do Grau de Doutor em Ciência do Solo.

Porto Alegre (RS), março de 2003

APOLINO JOSÉ NOGUEIRA DA SILVA
Engenheiro Agrônomo - UFRPE
Mestre em Agronomia - UFRPE

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de
DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em:
Pela Banca Examinadora

Homologado em:
Por

MÁRIO SÉRGIO VAZ CABEDA
Orientador-PPG-Ciência do Solo

CARLOS ALBERTO BISSANI
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo

JOÃO MIELNICZUK
PPG – Ciência do Solo - UFRGS

DALVAN JOSÉ REINERT
UFSM

THOMÉ LOVATO
UFSM

GILMAR ARDUINO B. MARODIN
Diretor da Faculdade de Agronomia

- aos meus pais, Apolino Nogueira e Dalva Correia, pelos exemplos de vida;
- a minha querida esposa Fabíola, pelo amor e amizade,

Dedico

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos aqueles que contribuíram com sugestões, correções e apoio para a realização deste trabalho. Meus maiores agradecimentos:

Ao nosso Deus, pela saúde e disposição que me tem dado;

Ao professor Mário Sérgio Vaz Cabeda, pela orientação, amizade e apoio ao longo de todo o curso;

À comissão orientadora, representada pelos professores Nestor Kämpf e Déborah Pinheiro Dick, pela avaliação do projeto de tese;

Aos professores Carlos Ricardo Trein, João Mielniczuk e José Miguel Reichert pelas sugestões valiosas por ocasião do exame de qualificação;

Aos professores Dalvan José Reinert, Thomé Lovato e João Mielniczuk pela participação na banca examinadora;

Ao corpo docente dos Departamentos de Solos, Engenharia Civil, Geociências e Educação da UFRGS, pelos conhecimentos transmitidos;

Ao professor Carlos Ricardo Trein, pela ajuda valiosa na realização dos testes de cisalhamento direto;

Aos funcionários da UFRGS: Adão, Antônia, Denise, Jader, Jorge, Márcio e Zé (Departamento de Solos) pelos seus serviços eficientes e amizade; ao laboratorista João (Departamento de Geociências) pela ajuda na confecção das lâminas delgadas.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), representada pelo Colégio Agrícola de Jundiá, pela liberação para realização deste curso e pela concessão da bolsa de estudo pelo programa PICDT;

À Usina Triunfo Agro-industrial, representada pelo Dr. Givago Raposo Tenório (Diretor Agrícola) pela permissão do uso das terras da Usina; ao Eng-Agº Arnaldo Jugurta (Coordenador de Fertirrigação) pelo apoio logístico durante os trabalhos de campo; ao Eng-Agº Etelmínio pelas informações referentes à área de estudo; e ao técnico agrícola Soares pelo apoio nas atividades de campo;

Aos professores Mateus Rosas Ribeiro e José Júlio Vilar Rodrigues pela

autorização da realização de algumas análises no laboratório de Física do solo da UFRPE; ao Eng-Agº José Fernandes W. (Zeca) pela ajuda nas coletas de solo na Usina, em Alagoas; e aos laboratoristas Anacleto e Camilo.

A minha família pela paciência;

Aos colegas do Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, pelo convívio e amizade.

ALTERAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DE UM ARGISSOLO AMARELO COESO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO COM CANA-DE-AÇÚCAR ⁽¹⁾

Autor: Apolino José Nogueira da Silva

Orientador: Professor Mário Sérgio Vaz Cabeda

RESUMO

O cultivo contínuo da cana-de-açúcar por longo tempo sob diferentes manejos em solos de tabuleiros costeiros pode causar alterações nas propriedades químicas, físicas e micromorfológicas do solo. Para estudar os efeitos de diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar nas propriedades de um ARGISSOLO AMARELO Coeso, quatro áreas foram selecionadas na usina Triunfo, no Estado de Alagoas, sendo uma área não irrigada, uma área irrigada, uma com aplicação de vinhaça e uma sob floresta nativa como condição original. Amostras foram tiradas de cada área a 0-0,2m, 0,2-0,4m e 0,4-0,8m de profundidade para determinar as alterações nas propriedades físicas, químicas e micromorfológicas do solo. A maior dispersão de argila nos solos cultivados com cana-de-açúcar promoveu um maior acúmulo desta partícula nas camadas subsuperficiais do solo. Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar afetaram as propriedades químicas do solo, resultando em alterações no limite de plasticidade, umidade ótima de compactação e agregação do solo. Todos os sistemas de manejo com cana-de-açúcar promoveram um aumento da compactação do solo, com conseqüente redução da porosidade e condutividade hidráulica saturada do solo. Os parâmetros de compressibilidade e a coesão do solo foram influenciados pelos sistemas de manejo e pelo teor de água do solo. Observações micromorfológicas evidenciaram modificações na estrutura do solo, no sistema de poros e no arranjo de partículas no solo.

⁽¹⁾ Tese de Doutorado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, (120 p.), março 2003.

PHYSICAL AND CHEMICAL ALTERATIONS OF A COHESIVE YELLOW ARGISOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS WITH SUGARCANE ⁽¹⁾

Author: Apolino José Nogueira da Silva
Adviser: Prof. Mário Sérgio Vaz Cabeda

ABSTRACT

The continuous cultivation of the sugarcane for long-term under different management in soils of coastal tablelands can cause alterations in the physical, chemical and micromorphological soils properties. To study the effect of different soil management systems with sugarcane in the properties of an cohesive Yellow Argisol, four sites were selected at Triunfo mill, in Alagoas State, being a site with irrigated cultivation, a site with not irrigated cultivation, a site with vinasse application and a site under native forest as original condition. Samples were collected from each site at 0-0,2 m, 0,2-0,2m and 0,4-0,8m depths to determine the alterations in the physical, chemical, and micromorphological soils properties. The largest clay dispersion in the soils cultivated with sugarcane promoted a larger accumulation of this particle in the subsuperficial layers of the soil. The management systems with sugarcane affected the chemical properties of the soil, resulting in alterations in the plasticity limit, optimum moisture for compaction and aggregation of the soil. All the management systems with sugarcane promoted an increase of the compaction of soil, with consequent reduction of the porosity and saturated hydraulic conductivity of the soil. The compressibility parameters and the cohesion of soil were influenced by the management systems and soil water content. Micromorphological observations evidenced modifications in the structure of the soil, in the system of pores and in the arrangement of particles in the soil.

⁽¹⁾ Doctoral thesis in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil, (120 p.), march 2003.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Eluviação de argila e óxidos e sua relação com horizontes adensados.....	4
2.2 Compactação de solos agrícolas.....	6
2.2.1 Relação entre atributos físicos e químicos que interferem na compactação do solo	9
2.3 Parâmetros de compressibilidade do solo.....	12
2.3.1 Fatores que Influenciam os parâmetros de compressibilidade do solo.....	14
2.4 Efeito do manejo nos parâmetros de cisalhamento do solo.....	16
2.5 Influência da vinhaça nas propriedades do solo.....	19
2.6 Alterações micromorfológicas de solos submetidos ao uso agrícola.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Localização e características do solo estudado.....	23
3.2 Seleção do solo, coleta e preparo das amostras	24
3.3 Análises físicas do solo.....	26
3.4 Análises químicas do solo.....	34
3.5 Análises micromorfológicas do solo.....	36
3.6 Análises estatísticas.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Propriedades químicas do solo.....	38
4.1.1 Cátions trocáveis, pH, condutividade elétrica e concentração crítica de floculação do solo.....	38
4.1.2 Óxidos de ferro, silício e alumínio.....	42
4.1.3 Carbono orgânico total e nas frações físicas da matéria orgânica do solo.....	44
4.2 Propriedades físicas do solo.....	46
4.2.1 Argila dispersa em água, argila no efluente e fracionamento de argila,.....	46
4.2.2 Limites de consistência e parâmetros da curva de compactação do solo.....	50
4.2.3 Densidade do solo.....	55

4.2.4	Porosidade e retenção de água no solo.....	57
4.2.5	Condutividade hidráulica saturada.....	61
4.2.6	Distribuição de classes de agregados e resistência dos agregados à ruptura.....	62
4.2.7	Parâmetros de cisalhamento direto do solo.....	67
4.2.7.1	Coesão e ângulo de atrito interno do solo.....	67
4.2.8	Parâmetros de compressibilidade do solo.....	71
4.2.8.1	Pressão de precompactação do solo.....	71
4.2.8.2	Índice de compressão do solo.....	76
4.3	Matéria seca de raízes.....	78
4.4	Propriedades micromorfológicas do solo.....	80
5	CONCLUSÕES.....	89
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
7	APÊNDICES.....	106

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Composição química média da vinhaça diluída.....	25
2 Composição química média da torta de filtro.....	25
3 Composição química média da água utilizada na irrigação.....	25
4 Cátions trocáveis e saturação por sódio em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	39
5 Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), condutividade elétrica (CE), pH em água e concentração crítica de floculação (CCF) do solo nos tratamentos estudados.....	41
6 Carbono orgânico total, carbono nas frações MO particulada e MO associada aos minerais em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	44
7 Argila dispersa em água, argila no efluente e argila total em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	47
8 Valores médios de umidade do solo nos limites de plasticidade (LP) e contração (LC), e faixa de friabilidade do solo em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	51
9 Umidade ótima de compactação (Uót) e densidade máxima de compactação (Dmáx) obtidos pelo ensaio de Proctor Normal para os diferentes sistemas de manejo e profundidades.....	55
10 Densidade do solo (Ds) e matéria seca de raízes (MSR) em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	56
11 Porosidade total e distribuição de diâmetro de poros em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	58
12 Distribuição percentual de classes de agregados do solo obtidos por peneiragem via seca e por via úmida nos sistemas de manejo e profundidades estudados.....	63

13	Valores de diâmetro médio ponderado obtidos por peneiragem via seca (DMPseco), via úmida (DMPúmido) e resistência dos agregados à ruptura nos tratamentos estudados.....	65
14	Valores médios de coesão do solo (kPa) em função do sistema de manejo e umidade nas profundidades estudadas.....	67
15	Valores de ângulo de atrito interno do solo em função dos sistemas de manejo e profundidades, no teor de água de 0,11 kg kg ⁻¹	69
16	Valores médios de pressão de precompactação (kPa) em função do sistema de manejo e teor de água nas profundidades estudadas.....	72
17	Valores médios de índice de compressão do solo em função do sistema de manejo e teor de água nas profundidades estudadas.....	76
18	Matéria seca de raízes em função dos sistemas sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV) nas profundidades estudadas	78

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Curva de compressão do solo e seus parâmetros principais.....	12
2 Gráfico tensão de cisalhamento em função da tensão normal aplicada e seus parâmetros coesão do solo (c) e ângulo de atrito interno.....	16
3 Desenho esquemático do equipamento utilizado para determinação da resistência dos agregados à ruptura.....	31
4 Deformação do solo em função do tempo de aplicação da pressão compressiva.....	33
5 Determinação da pressão de precompactação pelo método de Pacheco Silva.....	33
6 Distribuição de Fe, Al e Si ditionito (Fed, Ald e Sid) e Fe, Al e Si oxalato (Feo, Alo e Sio) nos sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV).....	43
7 Relação argila fina / argila total nos solos sob os sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV). Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% e comparam médias dos sistemas de manejo em cada profundidade.....	49
8 Relação entre o limite de plasticidade (LP) e o carbono orgânico total solo (COT) nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m.....	52
9 Curvas de compactação do solo (densidade do solo x teor de água) em função dos sistemas de manejo mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV), nas profundidades estudadas...	54
10 Curvas características de água do solo nas camadas a) 0-0,2m, b) 0,2-0,4m e c) 0,4-0,8m dos solos sob os sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), Irrigado (CI) e com vinhaça (CV).....	60
11 Condutividade hidráulica saturada (Ks) em função dos sistemas de manejo mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV), nas profundidades estudadas. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% e comparam médias dos sistemas de manejo em cada profundidade.....	62

12	Relação entre o diâmetro médio ponderado obtido por peneiragem via úmida (DMPúmido) e o carbono orgânico total (COT).....	66
13	Ângulo de atrito interno do solo em função da densidade do solo.....	70
14	Relação entre pressão de precompactação e densidade do solo.....	73
15	Micrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) em amostras do solo sob mata nativa (camada 0-0,2m), após teste de compressão uniaxial.....	74
16	Relação entre índice de compressão e densidade do solo.....	77
17	Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando a organização matricial da camada de 0-0,2m dos solos estudados.....	81
18	Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando a organização matricial da camada de 0,2-0,4m dos solos estudados.....	82
19	Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando a organização matricial da camada de 0,4-0,8m dos solos estudados.....	83
20	Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando aspecto de agregados dos solos estudados.....	84
21	Micrografias obtidas com microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrando agregados dos solos estudados.....	86
22	Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando feições de migração de partículas nos solos estudados.....	87

LISTA DE APÊNDICES

	Página
1 Descrição morfológica do solo sob mata nativa.....	107
2 Análise de variância dos parâmetros cálcio, magnésio, potássio e saturação por sódio para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	109
3 Análise de variância dos parâmetros capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), condutividade elétrica (CE), pH em água e concentração crítica de floculação (CCF) para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	110
4 Análise de variância dos parâmetros carbono orgânico total (COT), carbono na MO particulada, carbono na MO associada aos minerais para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	111
5 Análise de variância dos parâmetros limite de plasticidade, limite de contração e faixa de friabilidade para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	112
6 Análise de variância dos parâmetros densidade do solo, umidade ótima de compactação e densidade máxima de compactação para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	113
7 Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten para os solos sob os sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV) nos tratamentos estudados.....	114
8 Análise de variância dos parâmetros DMPseco (mm), DMPúmido (mm) e resistência dos agregados à ruptura (kPa) para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	115
9 Análise de variância dos parâmetros coesão do solo e ângulo de atrito interno para as médias de manejo dentro de camada profundidade.....	116
10 Equações de regressão correspondentes a coesão do solo (C, kPa) em função da umidade gravimétrica do solo (U_g , kg kg^{-1}) nos tratamentos estudados.....	117

11	Análise de variância do parâmetro pressão de precompactação do solo para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	118
12	Análise de variância do parâmetro índice de compressão do solo para as médias de manejo dentro de cada profundidade.....	119
13	Equações de regressão correspondentes a pressão de precompactação (Ppc, kPa) em função da umidade gravimétrica do solo (Ug, kg kg ⁻¹) nos tratamentos estudados.....	120

1. INTRODUÇÃO

Na região Nordeste do Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada nos solos coesos de tabuleiros costeiros com os sistemas de manejo sob condições de sequeiro, irrigado e fertirrigado com vinhaça. O cultivo intensivo da cana-de-açúcar por longo tempo com operações mecanizadas pode causar a compactação do solo, com conseqüente aumento da densidade, diminuição do tamanho dos poros e redução da condutividade hidráulica do solo. Estas alterações podem resultar em prejuízos à produtividade da cultura e aumento da erosão do solo.

A compactação do solo freqüentemente é causada pelo fato das atividades de cultivo serem realizadas com o solo num teor de água acima da faixa de friabilidade e/ou devido às pressões aplicadas ao solo excederem a sua capacidade de suportar carga. Este fato muitas vezes acontece na tentativa de se cumprir um cronograma de atividades agrícolas, sem observar as condições ideais de umidade e da capacidade do solo de suportar as pressões externas.

Os sistemas de manejo adotados com a cana-de-açúcar também têm provocado alterações em propriedades químicas do solo tais como cátions trocáveis, pH, óxidos e matéria orgânica do solo. A redução da matéria orgânica e cátions trocáveis podem refletir em mudanças nos parâmetros físicos do solo, como redução do limite de plasticidade, umidade ótima de compactação e estabilidade dos agregados, o que pode aumentar os riscos à compactação do solo. As alterações nas propriedades químicas do solo também podem resultar na dispersão da fração argila, favorecendo a sua migração e acúmulo em camadas subsuperficiais, contribuindo para o aumento do adensamento dessas camadas, o que pode restringir o crescimento radicular e impedir as plantas de explorar melhor o perfil do solo em busca de água e nutrientes.

Os sistemas de manejo, por outro lado, podem modificar as condições originais da estrutura do solo, e causar alterações nos parâmetros de

compressibilidade e cisalhamento do solo, e na resistência dos agregados à ruptura, refletindo na sua capacidade de suporte de carga. O estudo destas modificações é de grande importância para minimizar a compactação em atividades agrícolas futuras.

As modificações nas propriedades físicas do solo devido ao cultivo refletem as modificações da matriz do solo, no que diz respeito ao arrançamento das partículas, estrutura do solo e geometria dos poros. A observação destas alterações na matriz do solo constitui uma importante ferramenta para o entendimento das alterações físicas do solo devido ao cultivo.

A avaliação dos efeitos dos diferentes sistemas de manejo com a cana-de-açúcar nas propriedades físicas, químicas e micromorfológicas do solo torna-se necessária para se minimizar os efeitos desta cultura nos solos de tabuleiros costeiros.

Diante destas considerações, as hipóteses do nosso trabalho foram:

a) Há um acúmulo de argila e óxidos de ferro, silício e alumínio nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados com cana-de-açúcar, devido a maior dispersão da fração argila, causada por alterações nas propriedades químicas do solo.

b) Os sistemas de manejo sem aplicação de vinhaça reduzem a faixa de friabilidade, a umidade ótima de compactação do solo, e a estabilidade dos agregados, por reduzirem os teores do carbono orgânico e cátions trocáveis no solo.

c) Os solos cultivados com cana-de-açúcar apresentam uma maior capacidade de suporte de carga, em relação ao solo da mata, devido a um arrançamento mais denso das partículas no solo, promovido pela compactação destes solos.

Os objetivos deste trabalho foram:

a) determinar as alterações das propriedades físicas e químicas do solo devido aos diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar e avaliar as possíveis relações entre elas;

b) quantificar a pressão de precompactação, índice de compressão, coesão do solo, ângulo de atrito interno do solo e a matéria seca de raízes da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de manejo;

c) verificar a influência do teor de água na pressão de precompactação e na

coesão do solo;

d) verificar as modificações micromorfológicas na matriz do solo devido ao cultivo com cana-de-açúcar sob diferentes manejos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Eluviação de argila e óxidos e sua relação com horizontes adensados

A dispersão de argila em solos cultivados pode ocorrer devido a alterações nas condições químicas do solo tais como concentração e tipo de íons na solução do solo (Rengasamy, 1983) e variações do pH da solução do solo (Benites & Mendonça, 1998).

Alterações no teores de cátions trocáveis no solo devido ao cultivo pode exercer influência na dispersão de argila do solo. Rengasamy (1983) verificaram menor dispersão de argila em solos com maiores teores de cálcio e magnésio, enfatizando que cátions polivalentes reduzem a dupla camada difusa e formam pontes de cátions com partículas carregadas negativamente, aumentando a agregação.

Alterações químicas no solo provocadas pela água de irrigação aplicada têm sido verificadas na literatura (Pereira & Siqueira, 1979; Abo-Ghobar, 1993). Quando o íon dominante presente na água para irrigação é o sódio, esta pode provocar a degradação na estrutura do solo. O íon sódio, por ser monovalente, aumenta a espessura da dupla camada difusa na superfície das argilas, reduzindo as forças de atração entre elas, com conseqüente aumento da dispersão das partículas (Sposito, 1989).

Os efeitos do íon sódio na estrutura do solo foi verificado por Frenkel et al. (1978), onde constataram um aumento na dispersão de argila com o aumento dos teores de sódio em solos cauliniticos. A degradação estrutural devido ao efeito da sodicidade foi constatada através da redução da condutividade hidráulica saturada do solo. Os autores enfatizaram que o principal causa da degradação estrutural foi o adensamento provocado pelo bloqueio dos poros por argila dispersa.

A consequência do aumento da dispersão de argila também é constatada pela redução da estabilidade dos agregados do solo, ficando a fração argila em condições de ser facilmente transportada, sob condições de chuva ou irrigação, para horizontes subsuperficiais do solo (Nielsen et al., 1972).

Alguns trabalhos evidenciam que a eluviação de argila dispersa dos horizontes superficiais para horizontes subsuperficiais pode ser um fenômeno morfológico natural (Cabrera-Martinez, 1989; Silva, 2000), resultando num adensamento de camadas subsuperficiais. No entanto, a migração de partículas de argila para subhorizontes pode ser um processo significativo em solos cultivados, devido as novas condições químicas impostas ao solo, que pode deixar a fração argila num maior grau dispersão, em relação às condições originais do solo (Nielsen et al., 1972).

O acúmulo de argila em subsuperfície pode originar camadas mais adensadas e provocar mudanças importantes nas propriedades físicas do solo, como redução da condutividade hidráulica, aumento da coesão do solo e restrição à penetração de raízes (Mullins et al., 1990; Mitchell, 1976). A deposição de argila nas paredes dos poros e sobre os grãos de quartzo causa um arranjo mais compacto de partículas, aumentando o adensamento das camadas subsuperficiais (Souza, 1996).

Além da argila dispersa, os óxidos de ferro, silício e alumínio podem eluviar e acumular em camadas subsuperficiais do solo (Duncan & Franzmeier, 1999). Este fenômeno pode ocorrer devido a co-migração dos óxidos com a fração argila do solo, como verificado por alguns autores (Almeida et al., 1997, Silva, 2000; Nunes et al., 2002). Franzmeier et al. (1996) enfatizam que compostos de ferro e silício presentes em camadas superficiais movem-se através do perfil do solo, devido às variações do pH da solução, que podem promover a dispersão da fração argila e sua co-migração com óxidos. Quando o solo está seco, os efeitos do complexo argila-sílica-ferro ficam mais pronunciados, agindo como cimentantes temporários.

Além do adensamento em subsuperfície promovida pelo preenchimento de poros com argila iluvial, a complexação da fração argila com óxidos de ferro, silício e alumínio promove uma ação cimentante, podendo resultar num aumento da coesão do solo (McKeague & Sprout, 1975; Steinhardt et al., 1982; Kimpe et al., 1983).

A influência de óxidos de ferro no desenvolvimento da coesão do solo foi constatada por Chartres et al. (1990), que verificaram redução significativa nos

valores de coesão do solo e resistência ao cisalhamento após remoção dos óxidos de ferro mal cristalizados com solução de oxalato de amônio, evidenciando o efeito desses óxidos como agentes cimentantes em horizontes adensados de solos da Austrália (Hardsetting soils).

Nos solos coesos de tabuleiros do Brasil, a influência dos óxidos de ferro, silício e alumínio como agentes cimentantes nas camadas subsuperficiais têm sido verificada por alguns autores (Boulet et al., 1998; Silva, 2000; Filizola et al., 2001; Giarola et al., 2001). O termo “coeso” dos solos de tabuleiros tem sido empregado para caracterizar horizontes minerais subsuperficiais do solo que apresentam consistência friável quando úmidos, porém, quando estão secos, apresentam consistência dura, muito dura ou extremamente dura (Jacomine, 1996). O aumento do teor de argila e óxidos nas camadas subsuperficiais pode aumentar a coesão destes solos, prejudicando o desenvolvimento radicular da planta.

2.2 Compactação de solos agrícolas

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, resultando num aumento da densidade e redução do volume dos poros (Hillel, 1980). A degradação da estrutura do solo devido à compactação tem provocado efeitos negativos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, com prejuízos ao desenvolvimento das plantas e conseqüentemente na produção de alimentos (Gupta et al., 1989; Camargo & Alleoni, 1997).

De acordo com Horn et al. (1995), o processo de compactação do solo pode ocorrer devido à diminuição do espaço poroso entre os agregados, ocorrendo um rearranjo destes na matriz do solo, como também devido à ruptura e destruição dos agregados, havendo rearranjo e orientação das partículas, o que resulta numa massa coesa na matriz do solo. Estes processos vão depender do teor de água do solo e da pressão externa aplicada ao solo nas atividades agrícolas.

O arranjo mais compacto de partículas do solo pode ser um fenômeno pedogenético, adquirido durante o processo de formação do solo, decorrente de ciclos de umedecimento e secagem, e/ou expansão e contração da massa do solo (Baver, 1966). Em solos utilizados na agricultura, no entanto, a pressão sobre o solo imposta por veículos e implementos agrícolas tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação (Soane et al., 1981; Marsili et al., 1998).

Segundo Hakansson (1990), fatores relacionados às máquinas agrícolas, como elevada carga por eixo, pequena largura do pneu e alta pressão de inflação do pneu têm causado o aumento da compactação do solo. A seqüência de atividades com máquinas, como aplicação de cargas sobre o solo após o seu afrouxamento no preparo para o cultivo, também constitui um fator que tem aumentado a compactação dos solos agrícolas (Camargo & Alleoni, 1997).

Uma das principais causas da compactação do solo diz respeito às atividades agrícolas serem realizadas com o solo com teor de água inadequado. Segundo Hillel (1980) as atividades agrícolas devem ser realizadas com o solo no estado de friabilidade, que corresponde a faixa de umidade entre os limites de contração e plasticidade. Neste estado, o solo está úmido, demonstrando as condições ideais de preparo do solo, sendo portanto definida como a faixa de trabalhabilidade do solo (Cabeda, 1982). Nesta faixa de umidade, no entanto, a compactação pode ocorrer caso seja aplicada ao solo uma pressão maior que a sua capacidade de suportar carga (Kondo & Dias Júnior, 1999a). Quando as atividades agrícolas são realizadas acima da faixa de friabilidade, no estado de plasticidade, o solo fica mais susceptível à compactação, devido a sua menor resistência a pressões externas, ocorrendo mais facilmente a redução da porosidade e orientação das partículas de argila (Baver, 1966). Com o teor de água abaixo do limite de contração, no estado de dureza, a atração entre as partículas é elevada e o solo não deve ser trabalhado, pois origina grandes torrões e exige maior esforço das máquinas agrícolas (Ashburner & Sims, 1984). A determinação da faixa de friabilidade do solo torna-se um fator importante para minimizar a compactação do solo em decorrência do cultivo.

Para uma mesma energia de compactação aplicada, a densidade do solo aumenta com o conteúdo de água até atingir um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir com o aumento da umidade. Este fenômeno ocorre porque quando o solo está com baixo teor de água, o atrito entre as partículas é maior, havendo maior resistência ao rearranjo quando o solo é submetido às pressões externas (Hillel, 1980). À medida que o teor de água aumenta, esta age como lubrificante entre as partículas do solo, havendo um maior rearranjo, com conseqüente aumento da densidade até atingir um valor máximo. Esta umidade na qual o solo atinge a compactação máxima é conhecida com umidade ótima de compactação (Pinto, 2000).

As principais conseqüências da compactação nas propriedades físicas do solo são o aumento da densidade do solo, diminuição do tamanho dos poros e redução da condutividade hidráulica (Soane et al, 1981; Dexter, 1988; Hill, 1990). Numa microescala, a compactação devido a aplicação de pressões externas sobre o solo pode promover um rearranjo das partículas na matriz do solo, o que pode resultar em modificações na forma e continuidade dos poros do solo, e degradação da sua estrutura (Gupta et al., 1989; Lhotsky et al., 1991).

Marsili et al. (1998) verificaram alterações na estrutura do solo devido ao tráfego de máquinas em Cambissolo de textura média. Os autores verificaram que a estrutura do solo passou de blocos subangulares para maciça, resultando num aumento da resistência à penetração, redução da macroporosidade e modificação na forma dos poros, verificando-se poros alongados paralelos à superfície, o que contribuiu para a redução da condutividade hidráulica do solo. As modificações nestes atributos do solo podem limitar o desenvolvimento do sistema radicular, bem como aumentar o escoamento superficial, resultando no aumento da erosão do solo (Gupta & Allmaras, 1987).

A compactação do solo devido ao cultivo também pode causar modificações na retenção de água do solo, devido às alterações sofridas na distribuição de diâmetro dos poros do solo, principalmente redução da macroporosidade (Hillel, 1970). O aumento da retenção de água no solo devido à compactação tem sido verificado por alguns autores (Corsini et al., 1986; Stone et al., 1994; Klein & Libardi, 2002). Porém, a disponibilidade de água para as plantas vai depender do nível de compactação e da distribuição de diâmetro dos poros resultante (Hillel, 1970).

O arranjo mais compacto das partículas primárias e agregados do solo devido à compactação pode promover um novo estado de resistência do solo às pressões externas (Gupta et al., 1989), o que resulta em alterações na capacidade de suporte de carga do solo. Apesar do preparo do solo aliviar a compactação presente na camada superficial, esta pode permanecer na forma de um aumento da densidade dos agregados, o que resulta num aumento da resistência dos agregados à ruptura (Voorhees et al., 1978).

2.2.1 Relação entre atributos físicos e químicos que interferem na compactação do solo

A compactação do solo está ligada a vários atributos físicos e químicos, que dão ao solo condições de maior ou menor compactibilidade. Os diversos sistemas de manejo adotados no cultivo freqüentemente têm alterado as características químicas do solo devido às mudanças provocadas no teor de matéria orgânica, pH, óxidos e cátions trocáveis (Cerri et al., 1991; Greenland et al., 1992; Gomes Jr., 1995). Estas modificações nas propriedades químicas podem influenciar propriedades físicas como limites de consistência (Smith et al., 1985), umidade ótima de compactação (Díaz-Zorita & Grosso, 2000), estabilidade de agregados (Roth et al., 1991), resistência de agregados à ruptura (Dexter & Chan, 1991) e dispersão de argila (Rengasamy, 1983), que têm forte relação com a habilidade do solo de resistir à compactação (Gupta et al., 1989; Soane, 1990).

Os limites de consistência do solo podem ser alterados pelas modificações nos teores de carbono orgânico e cátions trocáveis do solo (Odell et al., 1960; Nettleton & Brasher, 1983). Smith et al. (1985) correlacionam os limites de liquidez e plasticidade com características químicas de 32 solos de Israel e encontraram correlações positivas entre a matéria orgânica e os limites de liquidez e plasticidade em solos com diferentes mineralogias. Segundo os autores, o aumento da matéria orgânica no solo tende a aumentar a área superficial específica do solo, com conseqüente aumento de retenção de água, levando-o a ter maiores valores nos limites de liquidez e plasticidade. A redução da matéria orgânica nos solos cultivados, no entanto, pode reduzir o limite de plasticidade do solo e a faixa de friabilidade, aumentando os riscos de compactação.

As alterações nas propriedades químicas do solo devido aos diferentes sistemas de manejo também podem causar alterações nos parâmetros da curva de compactação do solo (Thomas et al., 1996; Dias Júnior & Estanislau 1999; Barzegar et al., 2000). Díaz-Zorita & Grosso (2000) verificaram correlação positiva entre a umidade ótima de compactação determinada pelo ensaio de Proctor normal com o teor de carbono orgânico do solo. Segundo Soane (1990), o maior poder de absorção de água da matéria orgânica diminui a quantidade de água nas partículas minerais do solo, sendo necessária maior quantidade de água para as partículas se orientarem e o solo atingir a sua densidade máxima, o que resulta numa maior umidade ótima de compactação. A degradação das propriedades químicas nos

solos cultivados pode reduzir a umidade ótima de compactação destes solos, o que aumenta os riscos à compactação, pois eles podem atingir a compactação máxima mesmo quando trabalhados a baixos teores de água.

A estabilidade dos agregados tem sido relacionada à habilidade do solo de resistir às forças externas que promovem a compactação do solo (Soane, 1990; Baumgartl & Horn, 1991). A agregação do solo, no entanto, é influenciada por atributos como cátions trocáveis, óxidos, matéria orgânica particulada e associada aos minerais do solo (Munner & Oades, 1989; Rachid et al., 2001; Castro Filho et al., 2002). Ahmed et al. (1969) verificaram que solos com predomínio de cálcio e magnésio no complexo coloidal apresentaram um aumento na percentagem de agregados maiores que 0,25 mm em relação a solos com predomínio de potássio e sódio. Os autores enfatizam que os cátions cálcio e magnésio, por serem divalentes, promovem a redução da dupla camada difusa, aumentando a atração entre as partículas no solo, o que promove a agregação do solo.

A matéria orgânica do solo constitui um dos principais indicadores da qualidade do solo, tendo um papel importante na agregação do solo, retenção e infiltração de água e disponibilidade de nutrientes para as plantas (Greenland et al., 1992; Doran & Parkin, 1994). Silva (1993) verificaram correlação positiva entre o diâmetro médio ponderado dos agregados obtidos por peneiragem via úmida e os teores de carbono orgânico total e óxido de ferro, enfatizando a influência destes compostos na estabilização dos agregados.

A manutenção da estabilidade dos agregados é de fundamental importância para a resistência do solo às pressões externas. A estabilidade dos microagregados está relacionada à matéria orgânica associada aos minerais, que é a fração mais estável da matéria orgânica do solo, sendo formada pela fração que está complexada às partículas de silte e argila, formando complexos organo-minerais resultantes de diversos agentes ligantes como substâncias húmicas, óxidos de ferro e alumínio, e pelos produtos de excreção microbiana (Shang & Tiessen, 1998), o que faz com que os microagregados sejam mais resistentes à desagregação pela ação de água, impacto de gotas de chuva e pressões mecânicas impostas pelas práticas agrícolas (Tisdall & Oades, 1982).

A estabilidade dos macroagregados, no entanto, é dependente não só da matéria orgânica associada aos minerais, mais também da matéria orgânica particulada, que é formada por fragmentos de raízes finas, hifas de fungos e resíduos orgânicos em diversos estágios de decomposição (Golchin et al., 1997),

que unem os microagregados entre si, formando os macroagregados (Tisdall & Oades, 1982). Esta fração lábil da matéria orgânica 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 (Golchin et al., 1997; Rachid et al., 2001).

Vários trabalhos mostram que os diversos sistemas de manejos adotados influenciam a distribuição das frações físicas da matéria orgânica do solo (Blair et al., 1998; Pillon, 2000). Estas alterações têm influenciado sensivelmente a estabilidade de agregados do solo (Blair, 2000; Rachid et al., 2001), podendo ter conseqüências na porosidade, densidade e compressibilidade do solo.

Franzluebbers & Arshad, (1997) verificaram aumentos significativos nos teores de matéria orgânica particulada em solos cultivados com trigo sob plantio direto em relação ao solo sob preparo convencional, enfatizando o efeito benéfico do sistema plantio direto na manutenção desta fração da matéria orgânica e os benefícios que ela traz às propriedades do solo.

Estudando o efeito do cultivo da cana-de-açúcar em solos cauliniticos da Austrália, Blair (2000) verificou redução significativa nos teores da matéria orgânica particulada no solo cultivado em relação ao solo não cultivado. No entanto, comparando áreas cultivadas em sistemas de manejo com e sem queima da cana antes da colheita, os autores verificaram que o solo cultivado sem queima apresentou um teor de matéria orgânica particulada semelhante ao solo testemunha (sem cultivo), enfatizando o efeito da adição de resíduos nesta fração da matéria orgânica do solo. Estes resultados refletiram na estabilidade dos agregados, com aumentos no diâmetro médio ponderado e na percentagem de macroagregados nos solos com maior teor de matéria orgânica particulada.

Os diferentes sistemas de manejo adotados com a cana proporcionam diferentes condições de desenvolvimento da cultura, o que resulta em diferenças nos teores de matéria orgânica particulada e associada aos minerais, com conseqüências na estabilidade estrutural. A adoção de sistemas de manejo que promovam um maior aporte de matéria orgânica e de cátions trocáveis, resultando na maior estabilidade dos agregados, é um fator essencial para diminuir os risco à compactação do solo.

2.3 Parâmetros de compressibilidade do solo

A capacidade do solo de suportar carga e a determinação da facilidade com que ele reduz o volume de poros com a aplicação de pressões externas assume importante papel para minimizar os riscos à compactação em solos cultivados.

A redução do volume de vazios do solo decorrente de pressões exercidas sobre ele tem sido estudada pela curva de compressão do solo (Figura 1). Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão vertical aplicada ao solo e algum parâmetro relacionado com a estrutura do solo, como índice de vazios, porosidade ou densidade do solo (Larson et al., 1980; Smith et al., 1997).

O trecho inicial da curva (de menor inclinação) é chamado de curva de compressão secundária e reflete a história de tensões aplicadas ao solo no passado. Se a pressão aplicada ao solo corresponde a um ponto neste trecho da curva, as deformações sofridas pelo solo serão pequenas, elásticas e recuperáveis. O trecho retilíneo (de maior inclinação) é chamado de reta de compressão virgem. Se a pressão aplicada ao solo corresponde a um ponto neste trecho, o solo sofrerá

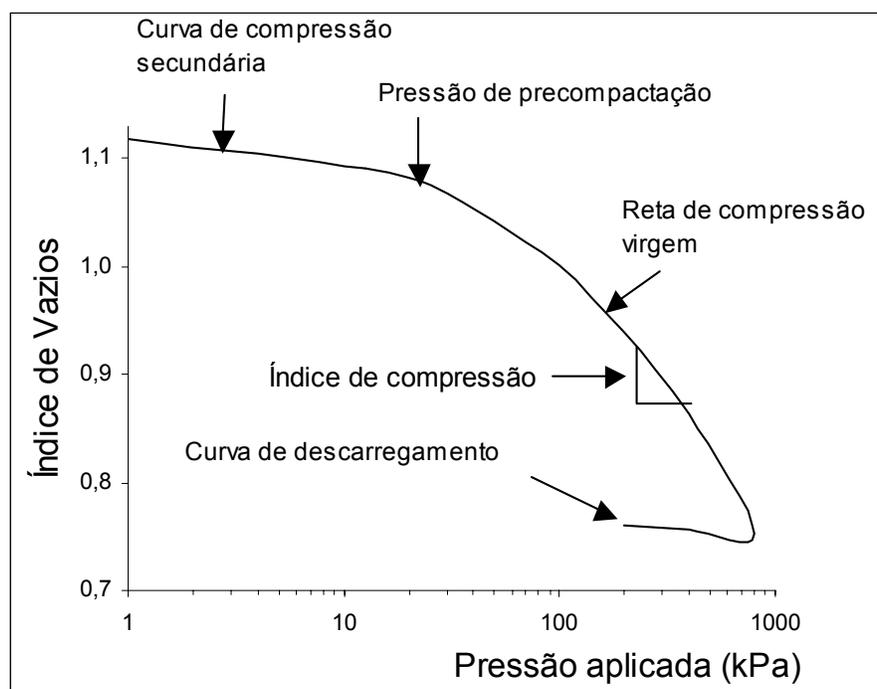


FIGURA 1. Curva de compressão do solo e seus parâmetros principais.

uma grande deformação plástica e não recuperável. A inclinação da reta de compressão virgem é chamada de índice de compressão do solo, sendo usada como um indicador da suscetibilidade do solo à compactação, pois representa a redução da porosidade em relação ao aumento da pressão aplicada. Quanto maior o índice de compressão, mais compressível o solo (Larson et al., 1980).

Segundo Gupta & Allmaras (1987), a compressibilidade é a facilidade com que o solo não saturado reduz o seu volume em função de uma força aplicada. No entanto, essa relação tensão-deformação é função de fatores externos como cargas aplicadas sobre o solo por máquinas agrícolas (pressão de inflação do pneu, carga por eixo, área de contato pneu/solo) e fatores internos como história de tensões sofridas pelo solo, umidade, textura, estrutura e densidade do solo (Gupta et al., 1985; Lebert & Horn, 1991).

Quando a pressão aplicada ao solo é maior que a pressão máxima já sofrida por ele na sua história de tensões, ocorrerão deformações plásticas e não recuperáveis, provocando compactação adicional, devido a modificações na porosidade e densidade do solo (Gupta & Allmares, 1987; Lebert & Horn, 1991). Contudo, quando é aplicada ao solo uma pressão externa menor que a pressão máxima já sofrida por ele, ocorrerá uma deformação pequena, com um efeito aproximadamente elástico e uma certa reversibilidade (Stone & Larson, 1980; Ortigão, 1995), não havendo uma compactação adicional significativa.

A pressão que separa esses dois fenômenos, de haver ou não compactação adicional no solo, é chamada de pressão de precompactação. Esta pressão separa os trechos correspondentes a reta de compressão virgem e a curva de compressão secundária (Figura 1), e corresponde a pressão máxima que o solo já sofreu na sua história de tensões, ou seja, no seu passado (Koolen & Kuipers, 1983). Portanto, o solo só sofrerá grandes deformações se for aplicada a ele pressões superiores à pressão de precompactação (Ortigão, 1995).

De acordo com Kondo & Dias Júnior (1999b), a pressão de precompactação corresponde a capacidade de suporte de carga de solos parcialmente saturados, tornando portanto importante o entendimento do comportamento da curva de compressão em diferentes sistemas de manejo, pois ela permite avaliar a suscetibilidade do solo a deformação e, conseqüentemente, à compactação.

2.3.1 Fatores que Influenciam os parâmetros de compressibilidade do solo

A pressão de precompactação e a compressibilidade do solo são influenciadas por diversos fatores como estabilidade de agregados e dispersão de argila (Conaracha et al., 2000), textura e matéria orgânica (Smith et al., 1997), adsorção de fosfato (Silva et al., 1999), teor de água (Genro Júnior et al., 1999), sistemas de manejo (Macedo, 1993; Carpenedo, 1994); intensidade de tráfego agrícola (Yavuzcan, 2000) e densidade inicial do solo (Rubin et al., 1999).

O estado de compactação do solo tem influência na sua capacidade de suportar carga. Silva et al. (2002b) estudando o efeito dos sistemas de manejo na pressão de precompactação de um Argissolo Vermelho Amarelo com diferentes faixas de densidade do solo, verificaram correlação positiva significativa entre a pressão de precompactação e a densidade inicial do solo. Quando o solo está num maior estado de compactação, o menor espaço poroso permite um maior número de pontos de contato entre as partículas do solo, aumentando a sua pressão de precompactação e conseqüente capacidade de suporte de carga.

Wiermann et al. (2000) estudando a influência dos sistemas preparo convencional e conservacionista (sem preparo e cobertura com resíduos) nas propriedades mecânicas de solo franco argiloso, verificaram maiores valores de pressão de precompactação na camada subsuperficial do solo (30cm) sob preparo convencional. Os autores atribuíram o resultado à formação de uma camada compactada em subsuperfície, decorrente do tráfego agrícola e implementos utilizados no horizonte superficial do solo.

A compressibilidade do solo também é influenciada pelo estado de compactação do solo. Silva et al. (2000) verificaram a redução do índice de compressão de um Podzólico Vermelho Amarelo com o aumento da densidade do solo. Com o solo num maior estado de compactação, o maior atrito entre as partículas promove uma maior resistência ao rearranjo, reduzindo a deformação do solo devido a pressões externas (Pinto, 2000).

Alguns trabalhos têm verificado a influência do teor de água do solo na capacidade do solo de suportar carga e na compressibilidade do solo (Carpenedo, 1994; Kondo & Dias Júnior, 1999a). Boeni (2000), através de ensaio de compressão uniaxial em um Argissolo Vermelho Distroférico de textura franco arenosa, verificou que em baixo teor de água ($0,09 \text{ kg kg}^{-1}$), esse solo suporta

pressões elevadas de até 110 kPa sem deformações significativas. Quando o solo foi submetido à compressão com um teor de água referente ao limite de plasticidade do solo ($0,15 \text{ kg kg}^{-1}$), a pressão de preconsolidação diminuiu para 57 kPa, evidenciando a diminuição da capacidade de suportar carga do solo com o aumento do teor de água do solo.

O índice de compressão também é influenciado pelo teor de água do solo. Silva et al. (2002a) estudando a influência da umidade na compressibilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo cultivado com milho sob plantio direto e preparo convencional, verificaram maiores valores de índice de compressão no solo com umidade mais elevada nos dois sistemas de manejo. Segundo os autores, o atrito entre as partículas quando o solo está mais seco é suficientemente grande para limitar o seu deslocamento e rearranjo, sendo necessária mais água para facilitar o deslocamento das partículas do solo.

O sistema de manejo do solo pode ser um fator de grande influência na capacidade do solo de suportar carga. Carpenedo (1994) comparando os sistemas de manejo do solo com preparo convencional aveia/milho e semeadura direta aveia/milho em um Argissolo Vermelho Amarelo, verificou valores mais elevados da pressão de preconsolidação nos solos sob semeadura direta. Segundo o autor, a grande adição de resíduos e os maiores teores de matéria orgânica do solo, associado à ausência de revolvimento neste sistema de manejo melhoram a estrutura do solo, conferindo ao solo uma maior resistência às pressões externas, principalmente a baixos teores de água. Etana et al. (1997), por outro lado, estudando a compressibilidade de solos com vários teores de matéria orgânica, verificaram que solos ricos em matéria orgânica apresentam um menor índice de compressão de solo. Os autores enfatizam a importância da conservação da matéria orgânica como um importante fator de proteção de solo contra a compactação, devido ao aumento da estabilidade dos agregados.

A pressão de precompactação do solo é dependente não só de fatores como densidade e umidade do solo mas também é fortemente influenciada por fatores relacionados à estrutura do solo como coesão e ângulo de atrito interno (Lebert & Horn, 1991). Estes autores trabalhando com solos de diversas classes texturais verificaram que em solos de textura média e argilosa os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito do solo) têm maior influência na pressão de precompactação, enquanto em solos arenosos a densidade do solo tem maior influência.

A avaliação da compressibilidade do solo e a sua capacidade de suportar cargas sob diferentes condições de umidade e sob os diversos sistemas de manejo adotados torna-se necessária com o intuito de se determinar as pressões que o solo pode suportar, visando minimizar os riscos à compactação.

2.4 Efeito do manejo nos parâmetros de cisalhamento do solo

A resistência ao cisalhamento do solo é definida como a máxima tensão cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. De acordo com Pinto (2000), o critério de ruptura de Mohr-Coulomb estabelece que “não há ruptura do solo enquanto a tensão de cisalhamento (τ) não ultrapassar um valor dado por: $c + \sigma \tan \phi$ ”; sendo “ c ” a coesão do solo, “ ϕ ” o ângulo de atrito interno do solo e “ σ ” a tensão normal atuante no plano de cisalhamento”. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb portanto é dado pela expressão: $\tau = c + \sigma \tan \phi$

Através do ensaio de cisalhamento direto do solo, tem-se um gráfico plotando-se a tensão cisalhante em função da tensão normal aplicada, através do qual é possível determinar a linha de pontos correspondente à ruptura do solo (Figura 2). Com os pontos obtidos na curva e por regressão determina-se a equação de Mohr-Coulomb para cada solo, com a qual se determina os parâmetros

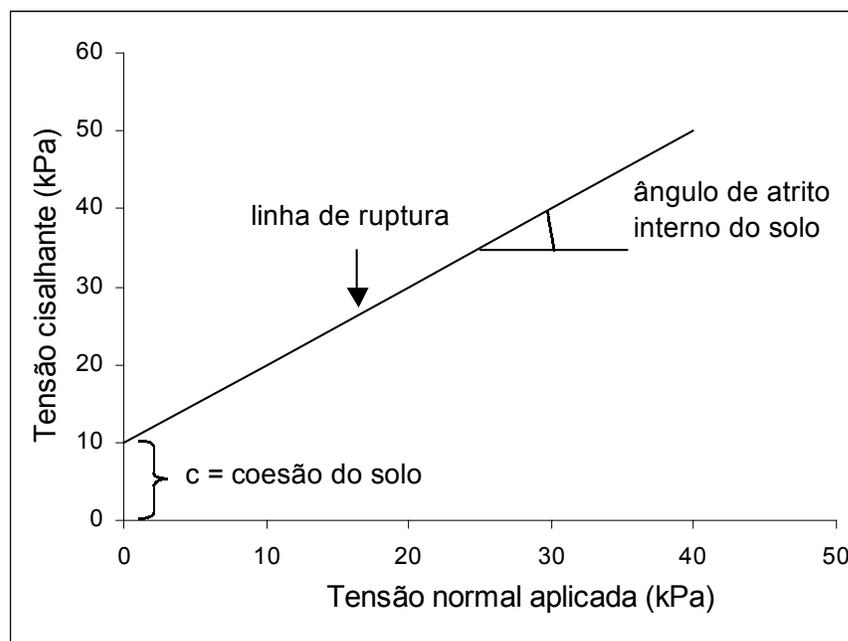


FIGURA 2. Gráfico tensão de cisalhamento em função da tensão normal aplicada e seus parâmetros coesão do solo (c) e ângulo de atrito interno.

coesão do solo (c), que representa a interseção da linha de ruptura com o eixo da tensão cisalhante, e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) que é a inclinação da reta e representa o atrito entre as unidades estruturais e texturais do solo .

O termo genérico “atrito interno do solo” inclui não só o atrito entre as partículas, mas também o atrito proveniente do arranjo entre elas, que se acomodam entre si, pois nos solos não existe uma superfície nítida de contato, mas uma infinidade de contatos pontuais (Caputo, 1988).

A coesão do solo é a força de atração entre as superfícies de duas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes (óxidos e argila) e/ou resultado de atração entre partículas muito próximas por forças eletrostáticas. A coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo e que tende a aproximar as partículas entre si, sendo uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993). A coesão pode ser entendida como a resistência ao cisalhamento de um solo quando nele não atua pressão externa, o que está compatível com a equação de Coulomb, quando a tensão normal (σ) é nula.

De acordo com McCormack & Wilding (1979), a resistência ao cisalhamento do solo é função da forma e distribuição de partículas do solo, estrutura, densidade, teor de água, tipo de argilomineral, tipo e quantidade de cátion presente e forças de repulsão e atração entre partículas. Segundo Pinto (2000), em solos arenosos a resistência ao cisalhamento depende do atrito entre as partículas, cujo ângulo de atrito interno depende da forma dos grãos, distribuição de diâmetro dos grãos e grau de compactação. Para solos argilosos, a resistência ao cisalhamento depende não só do atrito entre partículas como também da coesão do solo e da sua estabilidade estrutural (Lebert & Horn, 1991).

Poucos trabalhos têm sido conduzidos com o objetivo de estudar a resistência ao cisalhamento e a coesão do solo em solos agrícolas. Estes parâmetros são influenciados por diversos fatores como agregação (Bradford, 1981), textura (Schjonning, 1986), teor de água (McKyes et al., 1994), sistemas de manejo (Carpenedo, 1994), preparo do solo e pastejo (Gaggero, 1998) e tráfego agrícola (Machado & Trein, 2000; Yavuscan, 2002).

Através de ensaio de cisalhamento direto, Wiermann et al. (2000) estudaram os efeitos de dois sistemas de manejo na coesão do solo. No solo sob sistema conservacionista, com manutenção do resíduo na superfície do solo, a coesão a 30

cm de profundidade foi baixa (8,8 kPa). O sistema preparo convencional com aração a 25 cm de profundidade promoveu um aumento expressivo na coesão do solo para 35 kPa na mesma profundidade. Segundo os autores, o aumento da coesão no preparo convencional a 30 cm de profundidade refletiu o aumento na densidade do solo, como resultado das pressões provocadas pelos implementos agrícolas na camada superficial do solo.

Gaggero (1998) também observou que a coesão do solo é um sensível indicador das alterações na estrutura do solo devido aos diferentes manejos inferidos ao solo. Estudando o efeito do sistema de preparo e do pastejo de bovinos após colheita do milho nos parâmetros de cisalhamento de um Podzólico Vermelho Escuro textura franco argilosa, o autor observou aumentos significativos nos valores de coesão no solo sob preparo convencional em relação a semeadura direta aos 15cm de profundidade, bem como um aumento significativo na coesão após o pastejo nos dois sistemas de preparo, enfatizando que o pisoteio provoca um rearranjo das partículas do solo, promovendo uma maior coesão do solo.

O teor de água do solo tem grande influência no desenvolvimento da coesão entre as partículas. O aumento da coesão com a redução do teor de água do solo tem sido verificado por alguns autores (McKyes et al., 1994; Boeni, 2000). Arvidsson et al. (2001) verificaram um aumento da coesão do solo de 87 kPa para 154 kPa em solo de textura média, quando diminuiu o teor de água no solo de 0,17 kg kg⁻¹ para 0,11 kg kg⁻¹, evidenciando o grande efeito da umidade na coesão do solo. De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993), a diminuição do teor de água no solo reduz a distância entre as partículas, havendo um conseqüente aumento da atração entre elas, resultando num acréscimo da coesão do solo.

A coesão do solo é fortemente influenciada pelo teor de argila do solo, devido a sua elevada área superficial específica (Al-Shayea, 2001). Este autor trabalhando com solos com diferentes teores de argila, constatou um aumento da coesão de 40 kPa para 360 kPa em solos, respectivamente, com 10 e 40 % de argila, num teor de água de 0,10 kg kg⁻¹. Os autores também verificaram que o ângulo de atrito interno do solo diminui com o aumento do teor de argila do solo, enfatizando que as partículas de argila revestem a superfície das partículas de areia, diminuindo a fricção entre estas.

A compactação em solos cultivados também pode aumentar os valores de coesão do solo, como verificado por Arvidsson et al. (2001). De acordo com Lambe & Whitman (1979), quando o solo está compactado, o maior grau de

empacotamento decorrente da redução da distância entre as partículas do solo favorece o desenvolvimento da coesão quando o solo está com baixos teores de água. A orientação das partículas decorrente da compactação do solo também exerce influência na atração entre as partículas (Mitchell, 1976).

O efeito da densidade do solo na coesão também foi constatado por Rocha et al. (2002). Os autores estudando os parâmetros de cisalhamento de cinco classes de solo, verificaram maiores valores de coesão em solos com maior densidade.

2.5 Influência da vinhaça nas propriedades do solo

O aproveitamento de resíduos orgânicos gerados na produção agro-industrial e usados como fertilizantes é cada vez mais comum na agricultura atual. Entre os resíduos produzidos nas indústrias de açúcar e álcool, a vinhaça é o mais utilizado como fertilizante (Camargo et al., 1984). A vinhaça é um resíduo líquido orgânico, de coloração cinza clara e pH baixo, com média de 93% de água, sendo que 73% dos constituintes sólidos que a compõem são substâncias orgânicas e o potássio e o cálcio os componentes inorgânicos com maior abundância (Cerri et al., 1988).

De acordo com Gloria & Orlando Filho (1984), os principais estudos relacionados à aplicação de vinhaça ao solo diz respeito aos seus efeitos nas propriedades químicas, havendo geralmente um aumento na disponibilidade de nutrientes e na capacidade de troca de cátions do solo. Nunes et al. (1981) verificaram aumentos significativos nos teores de cálcio, magnésio e potássio trocáveis, bem como diminuição dos teores de alumínio trocável em solos que receberam vinhaça. A concentração de sais na vinhaça, no entanto, pode alterar os valores de condutividade elétrica do solo (Sengik et al., 1988). Estes autores verificaram aumento na condutividade elétrica quando foram aplicadas ao solo doses de vinhaça acima de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, porém este efeito foi restrito à camada superficial do solo.

A aplicação de vinhaça também pode promover um aumento do pH do solo (Leal et al., 1983). Segundo estes autores, os compostos orgânicos deste resíduo doam elétrons para vários receptores no solo como nitrato, óxidos de ferro e manganês, o que envolve o consumo de íons hidrogênio, com conseqüente elevação do pH do solo. Esse aumento nos valores de pH devido à aplicação de

vinhaça, no entanto, é temporário, ocorrendo apenas na primeira semana após a aplicação deste resíduo, reduzindo progressivamente até estabilizar em valores próximos ao pH original do solo.

As mudanças nas propriedades químicas do solo promovidas pela aplicação da vinhaça podem alterar as propriedades físicas como estabilidade de agregados e dispersão de argila do solo. Apesar do aumento temporário do pH devido à aplicação deste resíduo ao solo, alguns trabalhos mostram que a sua aplicação no solo por longo tempo melhora a estrutura, pelos seus efeitos na agregação do solo. Camargo et al. (1988) verificaram redução do teor de argila dispersa e um aumento no diâmetro médio ponderado dos agregados em um Latossolo Vermelho Escuro que recebeu vinhaça ($100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) por três anos, em relação ao solo testemunha. Segundo os autores, estes resultados estão relacionados à maior atividade microbiana e conseqüente maior produção de mucilagens, que atuam como agentes ligantes para formação e estabilização dos agregados do solo. A maior atividade microbiana em solos com vinhaça foi verificada por Leal et al. (1983), onde enfatizam que os microorganismos utilizam os compostos orgânicos deste resíduo como fontes de carbono.

2.6 Alterações micromorfológicas de solos submetidos ao uso agrícola

A micromorfologia do solo é uma técnica importante no estudo da organização dos constituintes do solo numa microescala, sendo feita através de seções delgadas com amostras indeformadas, permitindo uma visualização com aumentos de centenas de vezes. Uma das aplicações mais eficazes desta técnica na ciência do solo diz respeito ao estudo da estrutura do solo, em parâmetros como distribuição e geometria de poros, compactação, iluviação e agregação, permitindo identificar e avaliar com segurança como as práticas agrícolas podem afetar esses parâmetros (Bullock et al., 1985).

O cultivo do solo sob diversos sistemas de manejo tem provocado mudanças nas propriedades físicas e morfológicas decorrentes da compactação do solo (Corsini et al., 1986; Hill & Mesa-Montalvo, 1990). Apesar das mudanças nessas propriedades poderem ser mensuradas numa macroescala, geralmente elas são conseqüências de alterações na estrutura do solo em uma microescala (Paglai, 1987; Chartres & Norton, 1994; Drees et al., 1994).

As modificações na estrutura do solo devido às atividades de cultivo refletem alterações no arranjo das partículas na matriz do solo. Oliveira et al. (2000) observaram diferenças na organização das unidades estruturais e texturais do solo e na forma dos poros através de microscopia em lâminas delgadas. Em Cambissolos não cultivados, os indícios de atividades da fauna são mais evidentes, com presença de estruturas fecais e bioporos com grande individualização dos agregados. Nos solos cultivados, a matriz do solo apresentou um empacotamento mais denso de suas partículas, com maior presença de poros tipo fendas, distribuídos paralelos à superfície do solo, evidenciando a ocorrência da compressão do solo devido ao tráfego de máquinas agrícolas. A fragmentação de nódulos e concreções de ferro e manganês também foi observada nas áreas cultivadas, sendo também indicadores do efeito de máquinas no preparo do solo.

As alterações nas propriedades físicas do solo devido aos efeitos do cultivo podem ser melhor entendidas através de observações das mudanças na organização interna da estrutura do solo. Marsili et al. (1998) verificaram que a compactação em solo submetido ao tráfego de máquinas reduziu a macroporosidade e modificou a distribuição de tamanho dos poros em relação ao solo não compactado. Os autores enfatizaram que a redução na condutividade hidráulica do solo está associada à redução dos poros alongados na direção vertical e ao aumento destes na direção horizontal, paralelos a superfície do solo. Segundo os autores, poros alongados verticalmente são importantes pois afetam diretamente o crescimento das plantas por promover a penetração de raízes e a transmissão vertical de água e gases no solo.

As observações micromorfológicas também são importantes para determinação das mudanças provocadas por diferentes sistemas de cultivo. VandenBygaart et al. (1999) observaram alterações na organização das partículas na matriz do solo devido à mudança da prática de preparo convencional para plantio direto. Na área sob preparo convencional, observou-se a formação de uma crosta superficial, com orientação de argila e poucos agregados distintos. Após mudança para sistema plantio direto por 4 anos, poros alongados e horizontais ainda são evidentes, e o solo ainda apresenta um aspecto maciço, com predominância de microporos. Após 11 anos da implantação do plantio direto, a estrutura mostrou-se muito porosa, com poros interconectados e boa agregação do solo, refletindo o aumento da matéria orgânica e grande atividade microbiana.

Além de mudanças na porosidade e arranjo das unidades estruturais e texturais do solo, outra consequência do cultivo diz respeito a seus efeitos na movimentação de partículas para os subhorizontes do solo. Esse efeito pode ter origem nas mudanças químicas provocadas pelos diversos sistemas de manejo, como desbalanço de cátions e alterações no pH do solo, podendo promover a dispersão de argila que, associada às condições de chuva e/ou irrigação, elúviam e bloqueiam os poros (Helalia et al., 1988).

Dantas et al. (1998) verificaram feições de argila iluvial nos horizontes subsuperficiais de Podzólicos Amarelos cultivados com manga, constatando revestimento de argila iluvial sobre os grãos de quartzo na fração grosseira do solo, formando os típicos revestimentos em cúpulas. Tais revestimentos se dispõem aproximadamente paralelos à superfície do solo e contribuem para diminuição da permeabilidade dos subhorizontes. Nas lâminas delgadas da área não cultivada, constatou-se a presença de porosidade específica (bioporos), desenvolvida pela maior atividade biológica, além de uma maior frouxidão no empacotamento dos grãos, refletindo a menor compactação do solo.

As mudanças nos parâmetros físicos do solo devido aos sistemas de manejo e seus reflexos na estrutura do solo têm sido muito estudadas em associação com as mudanças micromorfológicas que ocorrem na estrutura do solo. As observações das condições originais da matriz do solo e das alterações referentes ao rearranjo das partículas e unidades estruturais, porosidade e estrutura do solo após o cultivo, tornam-se importantes para o melhor entendimento das mudanças nos parâmetros físicos devidas ao uso agrícola.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para testar as hipóteses apresentadas e atender aos objetivos do trabalho, foram selecionados quatro sistemas de manejo, sendo realizadas análises físicas, químicas e micromorfológicas do solo.

3.1 Localização e características do solo estudado

O trabalho foi desenvolvido em áreas localizadas na Usina Triunfo Agro-Industrial, localizada entre os paralelos 9°40'47" e 9°42'30" S e os meridianos 36°08'12" e 36°05'03" W, no município de Boca da Mata, região fisiográfica nº 119 do litoral do Estado de Alagoas.

O solo estudado foi classificado como um ARGISSOLO AMARELO Coeso latossólico textura média/argilosa (Apêndice 1), escolhido com base em levantamento pedológico realizado pela Usina (Prosped, 1992). O solo provém do grupo Barreiras que é formado por sedimentos areno-argilosos, cuja fração areia é constituída principalmente por quartzo e a fração argila predomina a caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro, principalmente goetita (Filizola et al., 2001).

O clima da área de estudo é tropical chuvoso com verão seco, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual fica em torno de 1200mm (Nimer, 1989) e a temperatura média anual ao redor de 29°C (Jacomine et al., 1975). O relevo é plano e suave ondulado, que é característico da unidade geomorfológica Tabuleiros Costeiros. A vegetação primária da região é constituída pela floresta subperenifólia, que hoje está resumida a pequenas áreas restritas às encostas e pequenas áreas de preservação nos topos dos tabuleiros (Jacomine et al., 1975).

3.2 Seleção do solo, coleta e preparo das amostras

Foram selecionados solos em áreas de produção com a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), sendo escolhidas três parcelas representativas de diferentes manejos adotados nesta cultura. Estes manejos foram comparados entre si e em relação a uma testemunha absoluta representada por solo em condições naturais (floresta subperenifólia). Todas as parcelas estão situadas numa mesma posição topográfica, em topo plano de platô costeiro, e são separadas por estradas para o tráfego de máquinas.

Os tratamentos receberam as seguintes identificações:

CS - solo não irrigado (Sequeiro);

CI - solo sob regime de irrigação;

CV - solo com aplicação de vinhaça;

MN - solo sob mata nativa.

O preparo do solo é o mesmo em todas as parcelas cultivadas (CS, CI e CV). No plantio da cana planta ou a cada 5-6 anos, quando da renovação do canavial, o preparo consiste em subsolagem realizada com subsolador marca Civemasa modelo STA 9P de 7 hastes, espaçadas 45cm uma da outra e com ponteiros de 7 cm de largura, trabalhando a uma profundidade de 35 cm. Após a subsolagem, são realizadas duas gradagens pesadas com grade de 18 discos de 30", trabalhando a uma profundidade de 25 cm com o objetivo de destruir a soqueira da cana. A abertura dos sulcos é feita com sulcador de 3 linhas a 25 cm de profundidade.

No plantio, as canas são distribuídas manualmente no sulco, e na colheita, as canas são cortadas manualmente e carregadas para caminhão MBB 2635 com carregadeira convencional Ford 5630. Em todas as áreas cultivadas a cana-de-açúcar é queimada antes da colheita.

Na área com fertirrigação com vinhaça (CV) são aplicados anualmente $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça diluída por ciclo da cultura e a aplicação é feita por aspersor com vazão de $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Também são aplicados 20 Mg ha^{-1} de torta de filtro na renovação do canavial. Este manejo é aplicado há 25 anos consecutivos nesta área. A composição química média da vinhaça e da torta de filtro são apresentadas nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

TABELA 1. Composição química média da vinhaça diluída.

pH	C.E.*	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Fe ²⁺
	dS m ⁻¹	-----g L ⁻¹ -----							mg L ⁻¹
5,71	3,60	9,3	0,56	0,19	0,96	0,28	0,13	3,11	1,14

*C.E.= condutividade elétrica

TABELA 2. Composição química média da torta de filtro.

C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	H ₂ O
-----g kg ⁻¹ -----							kg kg ⁻¹
63,2	3,6	1,46	2,3	15,8	2,4	2,6	0,77

Na área com cultivo sob irrigação (CI) é aplicada uma lâmina de 120 mm de água (parcelada em duas vezes) por ciclo da cultura, através de aspersor com vazão de 100 m³ h⁻¹, sendo esse tratamento aplicado há 25 anos consecutivos. A água utilizada é proveniente de açude próximo a área cultivada e a sua composição química é mostrada na Tabela 3. A adubação da cana planta é feita de acordo com análise do solo sendo geralmente administradas 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O respectivamente e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro, e na cana soca são aplicados 60 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O respectivamente.

TABELA 3. Composição química média da água utilizada na irrigação

pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Fe ²⁺	C.E.*	R.A.S.
	-----mmol _c L ⁻¹ -----							ppm	dS m ⁻¹	(mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}
7,1	0,15	0,23	1,76	0,174	1,74	0,032	0,641	0,664	0,261	4,04

*C.E.= condutividade elétrica; R.A.S = razão de adsorção de sódio.

A área sem irrigação (CS) é cultivada há 30 anos neste sistema de cultivo e nunca foi irrigada ou fertirrigada. São aplicados 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O respectivamente na cana planta e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro e na cana soca são aplicados 60 e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O respectivamente.

As amostras foram coletadas ao acaso nas áreas com os diferentes sistemas de manejo, nas camadas de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,8 m, seis meses após o primeiro corte da cana-de-açúcar. Em todas as áreas estudadas, as amostras foram retiradas num ponto situado a 40 cm da linha de plantio da cana-de-açúcar.

Com exceção das análises em que se utilizaram amostras indeformadas, todas as outras amostras foram pré-tratadas, sendo secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com abertura de 2 mm.

3.3 Análises físicas do solo

Foram realizadas as seguintes análises:

. Umidade gravimétrica – determinada por secagem da amostra a 105°C até massa constante e determinada pela expressão:

$$U_g = \frac{msu - mss}{mss} \quad \text{em que: } U_g = \text{umidade gravimétrica (kg kg}^{-1}\text{); } msu = \text{massa do solo úmido (kg); } mss = \text{massa do solo seco a 105}^\circ\text{C (kg).}$$

. Umidade volumétrica - determinada pela expressão:

$$U_v = \frac{U_g ds}{dl} \quad \text{em que: } U_v = \text{umidade volumétrica (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{); } U_g = \text{umidade gravimétrica (kg kg}^{-1}\text{); } ds = \text{densidade do solo (Mg m}^{-3}\text{); } dl = \text{densidade da água (Mg m}^{-3}\text{).}$$

. Curva característica de água no solo – foi determinada com amostras indeformadas de 8 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro. Para as tensões de 0,1, 0,3, 0,5, 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa foi utilizado um funil de placa porosa (tipo Haines) e para tensões de 33, 500 e 1500 kPa utilizou-se a câmara de pressão (câmara de Richards).

A curva característica de água no solo foi ajustada à equação de Van Genuchten (1980), dada pela expressão:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha |\psi|)^n\right]^m}$$

em que:

θ = umidade do solo (m³ m⁻³);

θ_r = umidade volumétrica residual (m³ m⁻³);

θ_s = umidade volumétrica de saturação (m³ m⁻³);

ψ = potencial matricial (kPa);

α , m e n são parâmetros empíricos.

. Densidade das partículas - determinada através do balão volumétrico de 50 ml, utilizando álcool etílico e terra fina seca em estufa (TFSE) a 105° e calculada pela expressão:

$$dp = \frac{mss}{Vs} \quad \text{em que: } dp = \text{densidade de partículas (Mg m}^{-3}\text{); } mss = \text{massa do solo seco a } 105^{\circ}\text{C (Mg); } Vs = \text{volume dos sólidos (m}^3\text{)}.$$

. Densidade do solo - determinada com amostras indeformadas obtidas com anel volumétrico de Kopeck e calculada pela expressão:

$$ds = \frac{mss}{Vt} \quad \text{em que: } ds = \text{densidade do solo (Mg m}^{-3}\text{); } mss = \text{massa do solo seco a } 105^{\circ}\text{C (Mg); } Vt = \text{volume total (m}^3\text{)}.$$

. Porosidade total - calculada a partir dos valores da densidade do solo e densidade das partículas, segundo a expressão proposta por Vomocil (1965):

$$P = 1 - \frac{ds}{dp} \quad \text{em que: } P = \text{porosidade total (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{); } ds = \text{densidade do solo (Mg m}^{-3}\text{); } dp = \text{densidade de partículas (Mg m}^{-3}\text{)}.$$

. Distribuição de diâmetro de poros – foram coletadas amostras indeformadas com amostrador de 8 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, sendo a distribuição de diâmetro dos poros determinada conforme Danielson & Sutherland (1986) pela expressão:

$$\phi = \frac{4 \cdot 10^5 \sigma_w}{dl g h}$$

em que:

ϕ = diâmetro do poro (μm);

σ_w = tensão superficial da água (J m^{-2});

dl = densidade da água (Mg m^{-3});

g = aceleração da gravidade (m s^{-2});

h = tensão matricial (kPa)

As classes de poros determinadas foram referentes aos poros com diâmetro maior que 1000 μm , a qual foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a umidade volumétrica do solo na tensão de $-0,3$ kPa. Poros com diâmetro entre 1000 e 50 μm e foi determinada pela diferença entre as umidades volumétricas de $-0,3$ kPa e -6 kPa. Poros com diâmetro entre 50 e 0,2 μm sendo obtida a partir da diferença entre as umidades volumétricas de -6 kPa e -1500 kPa e poros de diâmetro $<0,2\mu\text{m}$, obtida a partir da umidade volumétrica na tensão de -1500 kPa.

. Condutividade hidráulica saturada - amostras indeformadas foram coletadas com amostrador cilíndrico plástico de 8 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro e montadas em permeâmetro de carga constante e fluxo descendente conforme Embrapa (1997). Após um período de saturação de 24 horas, iniciou-se o fluxo e o percolado foi então coletado a cada 30 minutos e medidos até a obtenção de valores aproximados com no máximo 2% de diferença. A condutividade hidráulica saturada foi determinada segundo a equação de Darcy abaixo:

$$K_s = \frac{VL}{tAH}$$

em que:

K_s = condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1});

V = volume coletado (cm^3);

L = comprimento da amostra (cm);

A = área transversal da amostra (cm^2);

H = comprimento da amostra mais carga hidráulica (cm);

t = intervalo de tempo (horas)

. Análise granulométrica – determinada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997) usando-se solução de hexametáfosfato de sódio como agente dispersante.

. Argila dispersa em água – determinada usando-se o mesmo procedimento para determinação da argila total, porém sem emprego do dispersante químico;

. Fracionamento de argila – a argila foi fracionada em argila grossa (2 - 0,2 μm) e argila com diâmetro $< 0,2$ μm , por centrifugação. O tempo de sedimentação das

partículas por aceleração centrífuga foi determinada conforme Jackson (1965) pela expressão:

$$t = \frac{63 \cdot 10^8 \cdot n \log \frac{R}{S}}{r^2 \phi^2 \Delta s}$$

em que: t = tempo de sedimentação (min); n = viscosidade da água em função da temperatura (poises); r = rotação usada (rpm); ϕ = diâmetro da partícula (μm); Δs = diferença entre as densidades da partícula e da água em função da temperatura; R = raio de rotação em relação ao topo do sedimento (cm); S = raio de rotação em relação à superfície de suspensão (cm);

. Argila no efluente - o volume total do efluente coletado no ensaio de condutividade hidráulica saturada foi colocado em recipiente plástico. Após agitação com bastão para homogeneização da suspensão, uma amostra de 1000 mL foi colocada em proveta e a argila foi separada pelo método da pipeta. A concentração da argila na suspensão do efluente foi determinada por gravimetria.

. Limites de Atterberg: contração e plasticidade - foram determinados segundo Sowers (1965).

O limite de contração foi determinado utilizando a cápsula de contração, sendo o volume do solo contraído medido com Hg metálico. O limite de contração foi calculado segundo a ABNT (1982), pela expressão:

$$LC = \left(\frac{v_{ss}}{m_{ss}} - \frac{1}{dp} \right)$$

em que: LC = limite de contração (kg kg^{-1}); v_{ss} = volume do solo seco (m^3); m_{ss} = massa do solo seco a 105°C (kg); dp = densidade das partículas (kg m^{-3}).

O limite de plasticidade ou limite plástico inferior foi obtido pela determinação do teor de água correspondente ao início do fraturamento de uma amostra cilíndrica de solo com 3-4 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento, quando esta é rolada com as mãos em movimentos de vaivém sobre uma lâmina de vidro.

. Separação de agregados por via úmida - As amostras foram coletadas ao acaso nas áreas com os diferentes sistemas de manejo, sendo retirados blocos

indeformados de solo, com auxílio de enxadão e pá de corte, nas camadas de 0-0,2m, 0,2-0,4m e 0,4-0,8m. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e em caixas com espuma, para serem transportadas. Na separação de agregados por via úmida, seguiu-se o procedimento descrito por Kemper & Chepil (1965), com a modificação proposta por Tisdall & Oades (1979), utilizando-se toda massa de solo que passou na peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha. Após secadas ao ar por 72 horas, foram pesadas subamostras de 50 g e transferidas para bandejas com papel de filtro onde foram saturadas por capilaridade por um período de 24 horas.

Os agregados assim preparados foram transferidos para um conjunto de peneiras de 2,00, 1,00, 0,25, 0,105 e 0,053 mm de diâmetro de malha, os quais foram agitados em água, em agitador de oscilação vertical por 15 minutos, com 42 oscilações por minuto. O solo retido em cada peneira foi seco em estufa a 105°C e, após pesado e descontado o teor de areia, calculou-se a massa e a percentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de agregados. O diâmetro médio ponderado (DMP) foi determinado segundo Kemper & Chepil (1965) pela expressão:

$$DMP = \left(\sum_{i=1}^n d_i \frac{w_i}{w} \right)$$

em que:

DMP = diâmetro médio ponderado (mm);

d_i = diâmetro médio da classe "i" (mm);

w_i = massa de agregados da classe "i" seca em estufa a 105°C (g);

w = massa total da amostra do solo seca em estufa a 105°C (g).

Separação de agregados por via seca - foram realizadas com as amostras de agregados passadas em peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha. Após secadas ao ar por 72 horas, subamostras de 50 g foram transferidas para um conjunto de peneiras de 2,00, 1,00, 0,25, 0,105 e 0,053 mm de diâmetro de malha, os quais foram agitados em vibrador Produtest por dois minutos. O solo retido em cada peneira foi seco em estufa a 105°C e, após pesado, calculou-se a percentagem de agregados em cada uma das classes de agregados.

. Ensaio Proctor normal – determinado com cilindro de 1000 cm^3 e soquete de 2,5 kg, provocando uma energia de compactação de 583 kJ m^{-3} , determinada segundo Caputo (1988) pela expressão:

$$E = \frac{P h N n}{V}$$

em que: E = energia de compactação (kJ m^{-3}); P = peso do soquete (N); h = altura de queda do soquete (m); N = número de golpes por camada; n = número de camadas; V = volume do solo compactado (m^3).

. Resistência dos agregados à ruptura – Foi determinada usando-se uma balança mecânica como máquina de alavanca conforme figura abaixo:

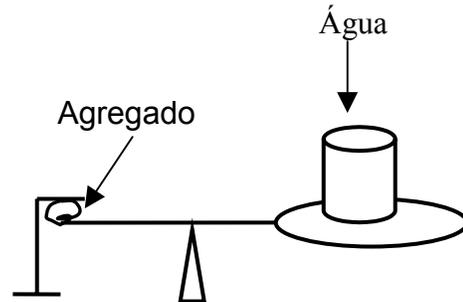


FIGURA 3. Desenho esquemático do equipamento utilizado para determinação da resistência dos agregados à ruptura.

Foram coletados 45 agregados em três pontos aleatórios de cada tratamento (15 agregados em cada ponto). Os agregados foram secos ao ar por 24 horas, passados em peneira de 2,83 mm e retidos em peneira de 2 mm, e depois colocados em dissecador, ficando com teor de água médio de $0,08 \text{ kg kg}^{-1}$. Para determinação da resistência à ruptura, os agregados foram colocados entre dois braços horizontais (Figura 3) e uma força vertical foi aplicada através de um recipiente no qual foi adicionada água até haver a ruptura dos agregados entre os braços horizontais, determinando-se então a massa da água no recipiente. A resistência dos agregados à ruptura foi determinada pela expressão:

$$R = \frac{0,199 \cdot F}{d^2} \quad \text{em que: } R = \text{resistência dos agregados à ruptura (kPa); } F = \text{força}$$

necessária para ruptura dos agregados (kN) e d = diâmetro efetivo do agregado (m), calculado segundo Dexter & Kroesbergen (1985) pela expressão:

$d = d' \cdot \left(\frac{m}{m'} \right)^{0,33}$ em que: d' = diâmetro médio da peneira (2,415 mm); m = massa individual do agregado (g); m' = massa média dos 45 agregados (g).

. Matéria seca de raízes - foram sorteadas três linhas de sulcos de cana-de-açúcar em cada tratamento, coletando-se as raízes numa área de 0,48 m², correspondendo a 0,4m de comprimento em cada sulco, e 0,6m perpendicularmente à linha do sulco. Todo o solo dessa área foi retirado até 80 cm de profundidade, passado em peneira de 1 mm de malha e catada manualmente, recolhendo-se as raízes encontradas. As raízes foram lavadas com água, secadas em estufa a 60° C e pesadas para se obter a massa de matéria seca. As amostras foram coletadas aos seis meses após o primeiro corte da cana-de-açúcar.

. Ensaio de compressão uniaxial

Foram retiradas amostras indeformadas nas profundidades de 0,1m e 0,3m com auxílio de amostrador contendo anéis metálicos rígidos com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, e posteriormente acondicionadas em sacos plásticos sobre espuma, para serem transportadas sem perturbação até o laboratório. No laboratório as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de solo do anel e depois saturadas por ascensão capilar durante 24 horas. As amostras foram submetidas a tensões correspondentes aos teores de água médios de 0,08, 0,11, 0,14 e 0,19 kg kg⁻¹. Estas tensões foram determinadas a partir das curvas características de água no solo realizadas com amostras indeformadas.

As amostras preparadas foram submetidas a ensaios de compressão confinada conforme ABTN (1990), com adaptações para solo não saturado, sendo realizados em uma prensa de compressão uniaxial marca Testop. A razão de carga aplicada foi igual a 2, com seqüência de 12,5, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa e leituras realizadas aos 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 5, 6 e 7 minutos. O tempo de 7 minutos para o incremento de pressões foi determinado através de pré-testes, verificando-se que neste tempo ocorreu cerca de 98% da deformação (Figura 4). A deformação relativa do solo $(h_i - h_f)/h_i$ foi determinada pela diferença entre a altura inicial da amostra (h_i) e a altura final (h_f) após a aplicação de cada pressão, dividida pela altura inicial (Holtz & Kovacs, 1981). Após o ensaio de

compressibilidade, as amostras foram levadas à estufa para determinação da umidade gravimétrica.

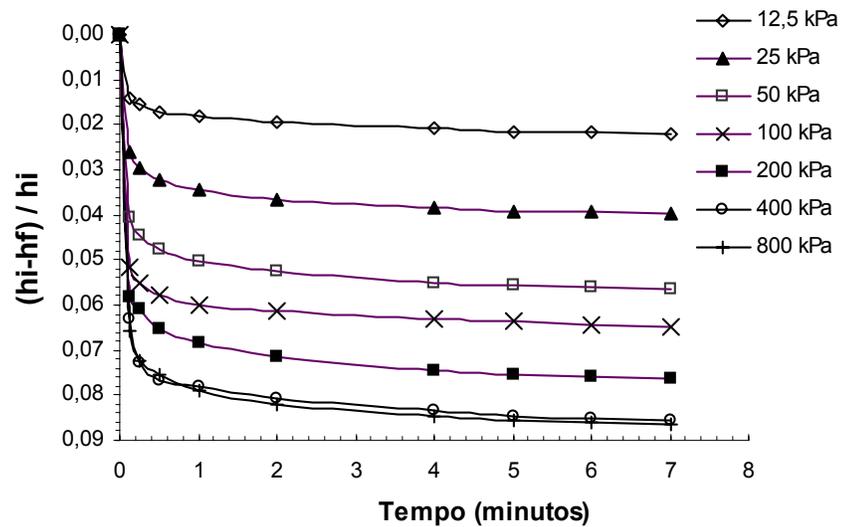


FIGURA 4. Deformação do solo em função do tempo de aplicação da pressão compressiva.

Com os resultados foram traçadas as curvas de compressibilidade do solo, sendo determinada a pressão de precompactação pelo método Pacheco Silva (ABNT 1990), conforme a figura abaixo.

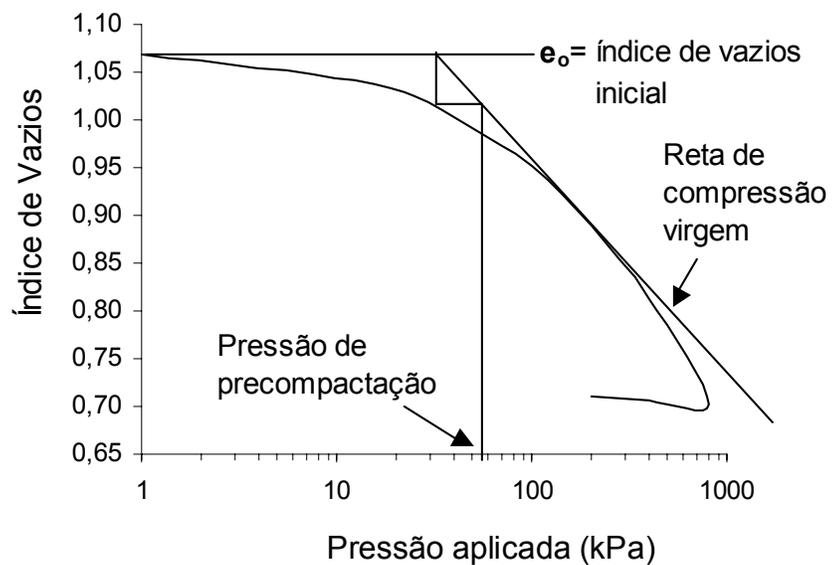


FIGURA 5. Determinação da pressão de precompactação pelo método de Pacheco Silva.

O índice de compressão (C_c) foi determinado conforme Lambe (1979) pela expressão:

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log P} \quad \text{em que: } \Delta e = \text{variação do índice de vazios na reta virgem;}$$

$\Delta \log P$ = variação do logaritmo da pressão aplicada no intervalo correspondente.

. Ensaio de cisalhamento direto

Foram retiradas amostras indeformadas com auxílio de amostrador contendo anéis metálicos rígidos com 6,5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura nas profundidades de 0,3m e 0,6m nos quatro tratamentos estudados. As amostras foram coletadas em três repetições distribuídas em posições aleatórias em cada tratamento e posteriormente acondicionadas com filmes de PVC e espuma para serem transportadas sem perturbação até o laboratório. O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em equipamento de marca ELE modelo D-300 A, sendo a amostra colocada em caixa bipartida na qual foram aplicadas as forças normal e cisalhante com velocidade de deslocamento de $0,3 \text{ mm min}^{-1}$, até ocorrer a ruptura da amostra ao longo de um plano horizontal.

Os parâmetros tensão cisalhante, coesão e ângulo de atrito interno foram determinados conforme Lambe (1951) pela expressão de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_v \tan \phi$$

em que: τ = tensão de cisalhamento (kPa); c = coesão do solo (kPa); σ_v = tensão vertical aplicada (kPa) e ϕ = ângulo de atrito interno do solo ($^\circ$).

A coesão do solo foi determinada sem aplicação de tensão normal (0 kPa) com o solo nos teores de água de 0,08, 0,11 e 0,14 kg kg^{-1} . O ângulo de atrito interno do solo foi determinado apenas com o solo no teor de água de 0,11 kg kg^{-1} , sendo utilizados pesos de 0; 3,0 e 6,0 kgf, correspondentes a pressões normais de 0; 104,07 e 208,14 kPa respectivamente.

3.4 Análises químicas do solo

. pH em H_2O - determinado numa suspensão solo-água 1:2,5 e analisado em potenciômetro.

- . Ca, Mg, Al, Na e K trocáveis – determinados conforme Tedesco et al. (1995). O sódio e potássio foram determinados por fotometria de chama, o cálcio e magnésio determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o alumínio determinado por volumetria.
- . Acidez trocável (H + Al) - determinada por volumetria, com extração por KCl e titulada pelo hidróxido de sódio.
- . Capacidade de troca de cátions efetiva – dada pela soma Ca, Mg, Na e K trocáveis mais a acidez trocável (H + Al).
- . Condutividade elétrica do solo - determinada no extrato de saturação conforme Tedesco et al. (1995).
- . Concentração crítica de floculação – foi determinada com suspensões de solo (20g L⁻¹), usando soluções de CaSO₄.2H₂O em concentrações variando de 1 a 4 mmol_c L⁻¹. As amostras foram agitadas por 12 horas e posteriormente ficaram em repouso por 24 horas. A floculação foi inspecionada visualmente e a concentração crítica de floculação foi determinada pela média de dois valores, correspondentes a menor concentração eletrolítica de CaSO₄.2H₂O suficiente para promover a floculação das partículas e a maior concentração que não promoveu a floculação (Sposito, 1989).
- . Óxidos de Fe, Al e Si livres - extraídos com citrato-ditionito-bicarbonato de sódio e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, após duas extrações, conforme Mehra & Jackson (1960);
- . Óxidos de Fe, Al e Si amorfos - extraídos com oxalato ácido de amônio e determinados por espectrofotometria de absorção atômica conforme McKeague & Day (1966).
- . Carbono orgânico total – determinado segundo Tedesco et al. (1995) por volumetria, com o carbono oxidado pelo dicromato de potássio e titulado com sulfato ferroso.

. Carbono nas frações físicas da matéria orgânica: foram determinados conforme Cambardella & Elliott (1992) sendo separada a matéria orgânica particulada (MO particulada) que corresponde a fração orgânica retida na peneira com abertura de 53 μ m, junto com a fração areia, e a matéria orgânica associada aos minerais (MO associada aos minerais) que corresponde a fração orgânica que passa na peneira de 53 μ m, associada às frações silte + argila.

A dispersão da amostra foi feita por agitação de 10 gramas de solo em 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹) por 3 horas em recipientes de vidro de 250 mL com 3 bolinhas de vidro. Após a dispersão a suspensão do solo foi colocada em peneira de abertura 0,053mm para separação das duas frações e lavada com jatos de água. O material que passou na peneira, que correspondente as frações silte + argila foi colocado em recipiente e seco em estufa a 45°C sendo posteriormente analisado o teor de carbono orgânico total segundo Tedesco et al., (1995). O carbono desta fração corresponde ao carbono da matéria orgânica associada. O carbono da fração orgânica retida na peneira de 53 μ m (MO particulada) foi calculado por diferença entre o carbono orgânico total do solo (não fracionado) e o carbono da matéria orgânica associada aos minerais (MOA).

3.5 Análises micromorfológicas

Foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de caixas de Kubiena para posterior confecção das lâminas delgadas no departamento de Geociências da UFRGS. Para padronizar a amostragem, as amostras foram coletadas a 30 cm das linhas de plantio da cana-de-açúcar e na região central (metade da espessura) de cada horizonte, sendo devidamente etiquetadas com identificação e orientação.

A impregnação das amostras foi feita segundo metodologia descrita por Jongerius & Heintzberger (1963). As amostras indeformadas foram inicialmente secas ao ar, depois levadas à estufa a 40°C para eliminar o excesso de umidade. Posteriormente foram impregnadas sob vácuo com mistura composta de resina poliéster Resapol T208, monômero de estireno (solvente) e peróxido de metil-etil-cetona (catalisador).

Após a impregnação as amostras foram desbastadas utilizando máquina de corte com disco de diamante. Os blocos de solo formados foram colados em lâminas de vidro com a mistura Araldite Epoxi CY248 mais endurecedor HY956, e posteriormente foram submetidos a polimentos sucessivos em sistema rotativo

marca Montasupal, com abrasivos de carbetto de silício com granulações nº 320, 600 e 1000, até ficarem com espessura final entre 30 - 35 μm . A espessura final das lâminas foi verificada com paquímetro, associado à observação das cores de interferência dos minerais nas lâminas, com auxílio do microscópio petrográfico. A limpeza das lâminas delgadas foi realizada em cubas de ultra-som conforme Murphy (1986).

As lâminas delgadas foram estudadas com microscópio petrográfico de luz transmitida marca Carl Zeiss Jeneval, do departamento de Solos (UFRGS), para observações na organização da matriz do solo no que diz respeito à geometria de poros, microestrutura e arranjo das unidades estruturais e texturais dos solos nos sistemas de manejo estudados. As descrições micromorfológicas das lâminas foram feitas segundo os conceitos de Bullock et al. (1985).

As micrografias nas lâminas delgadas foram obtidas com câmara fotográfica Canon Prima Super 105, com controle de exposição automático, utilizando filmes coloridos ISO 400, com magnificações entre 100 e 250 vezes.

Para observações de empacotamento de partículas argila e silte, amostras de agregados foram preparadas por metalização com o elemento ouro e foram analisadas com microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL, modelo JSM 5800, com voltagem de aceleração de 15 kV, sendo usadas magnificações variando de 200 a 10000 vezes. As micrografias foram obtidas por câmera Kodak Polaroid acoplada ao MEV, no centro de microscopia eletrônica da UFRGS.

3.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e a comparação das médias realizada pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%, usando-se o software SANEST. As análises estatísticas dos dados foram feitas para cada camada do solo separadamente. As análises de regressão foram feitas com o software SigmaStat 2.03.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades químicas do solo

4.1.1 Cátions trocáveis, pH, condutividade elétrica e concentração crítica de floculação do solo

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis decresceram significativamente nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa na camada de 0-0,2m (Tabela 4). Nesta camada, as médias gerais dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram de 2,32 e 2,13 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ respectivamente (Apêndice 2). O solo com vinhaça, no entanto, além de ter sofrido a menor redução nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, apresentou um aumento significativo do teor de K^+ trocável em relação aos outros tratamentos em todas as camadas estudadas, devido aos teores elevados deste elemento na composição da vinhaça (Tabela 1). Esse aumento no teor de K^+ trocável do solo devido à aplicação da vinhaça tem sido observado por outros autores (Orlando Filho et al., 1983; Ribeiro & Sengik, 1983).

O solo sob o sistema irrigado apresentou valores significativamente superiores de saturação por Na^+ em relação aos outros tratamentos nas três camadas estudadas, provavelmente, devido aos teores de sódio na composição da água de irrigação aplicada, a qual apresenta uma razão de adsorção de sódio (RAS) igual a 4,04 ($\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$)^{1/2} e uma condutividade elétrica de 0,261 dS m^{-1} (Tabela 3). Segundo Holanda & Amorim (1997), esta água é classificada como do tipo C_1S_2 , ou seja, de baixo risco à salinidade e risco moderado à sodicidade do solo. Apesar dos valores de saturação por Na^+ estarem abaixo do nível determinado por Embrapa (1997) para o caráter sódico ao solo ($\% \text{Na} \geq 15\%$), o teor mais elevado de Na^+ no complexo coloidal do solo irrigado pode promover a dispersão de argila do solo (Russo & Bresler, 1977). A maior redução dos teores

TABELA 4. Cátions trocáveis e saturação por sódio em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

camada (m)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
	Ca^{2+} (cmol _c kg ⁻¹)			
0-0,2	2,91 Aa	1,93 Ca	1,88 Ca	2,59 Ba
0,2-0,4	1,34 Ab	0,84 Cb	1,14 Bb	1,29 Ab
0,4-0,8	0,80 Bc	0,57 Cc	0,78 Bc	0,91 Ac
	Mg^{2+} (cmol _c kg ⁻¹)			
0-0,2	2,79 Aa	1,69 Da	1,78 Ca	2,26 Ba
0,2-0,4	1,71 Ab	1,03 Cb	1,19 Bb	1,69 Ab
0,4-0,8	0,62 Bc	0,61 Bc	0,79 Ac	0,81 Ac
	K^+ (cmol _c kg ⁻¹)			
0-0,2	0,12 Ca	0,19 Ba	0,10 Da	0,76 Aa
0,2-0,4	0,10 Bb	0,03 Cb	0,09 Ba	0,35 Ab
0,4-0,8	0,02 Cc	0,01 Cc	0,07 Bb	0,25 Ac
	Al^{3+} (cmol _c kg ⁻¹)			
0-0,2	0,43 Ac	0,37 Ac	0,38 Ab	0,35 Ab
0,2-0,4	0,48 Ab	0,50 Ab	0,41 Ab	0,43 Ab
0,4-0,8	1,32 Ba	1,44 Aa	1,43 Aa	1,33 Ba
	Saturação por Na ⁺ (%)			
0-0,2	0,39 Ca	0,77 Ba	2,19 Aa	0,30 Ca
0,2-0,4	0,11 Bb	0,40 Bb	2,32 Aa	0,14 Bb
0,4-0,8	0,14 Bb	0,16 Bc	2,26 Aa	0,13 Bb

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições.

MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado pode prejudicar a estabilidade dos agregados destes solos, já que estes cátions, juntamente com o Al^{3+} , têm importante papel na agregação do solo fazendo pontes entre a superfície da argila e compostos orgânicos (Munner & Oades, 1989; Roth et al., 1991).

As diferenças nos teores de cátions trocáveis refletiram na capacidade de

troca de cátions efetiva dos solos nos tratamentos estudados (Tabela 5), havendo decréscimo nas três áreas cultivadas em relação ao solo da mata. O sistema de manejo com aplicação de vinhaça, no entanto, proporcionou a menor redução na capacidade de troca de cátions entre os solos cultivados com cana-de-açúcar. A manutenção dos cátions trocáveis decorrentes da adição da vinhaça ao solo, associado à eliminação da queima da cana por ocasião da colheita, que promove um melhor retorno orgânico ao solo com restos culturais, provavelmente contribuirá para manutenção da qualidade do solo para o bom desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar.

Os valores de condutividade elétrica na área com vinhaça foram significativamente mais elevados em relação aos outros tratamentos nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m. Apesar da vinhaça aplicada ter uma condutividade elétrica de 3,6 dS m⁻¹ (Tabela 1), os níveis encontrados no solo com aplicação deste resíduo no presente estudo não são prejudiciais para a cana-de-açúcar e para a maioria das plantas cultivadas (Lima, 1997), estando bem abaixo do limite considerado pela Embrapa (1997) para caracterizar o caráter salino ao solo (CE > 4 dS m⁻¹). Benke (1998) estudando a influência da aplicação de vinhaça em solos caulíníticos também verificou que os efeitos da aplicação deste resíduo na condutividade elétrica do solo, com doses semelhantes ao presente estudo, restringiram-se às camadas superficiais do solo. No presente estudo, a média geral de condutividade elétrica na camada de 0-0,2m foi de 0,27 dS m⁻¹ (Apêndice 3).

Os valores de pH do solo foram maiores nos solos cultivados em relação ao solo da mata, o que pode ser resultado dos efeitos residuais da calagem administrada ao longo dos anos. O aumento do pH pode resultar em aumento da dispersão de argila em solos de carga variável, devido à geração de cargas negativas nas partículas do solo (Sparks, 1995).

Os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentaram os maiores valores de concentração crítica de floculação nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m, indicando que as partículas do solo nestes dois sistemas de manejo são mais dispersíveis, o que pode estar refletindo os menores valores de cálcio e magnésio e a maior saturação por sódio. A menor concentração crítica de floculação do solo com vinhaça provavelmente reflete a maior condutividade elétrica deste solo nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m, onde os sais presentes contribuem para floculação das partículas do solo.

TABELA 5. Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), condutividade elétrica (CE), pH em água e concentração crítica de floculação (CCF) do solo nos tratamentos estudados.

camada (m)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
	CTC efetiva (cmol _c kg ⁻¹)			
0-0,2	12,84 Aa	7,70 Ca	8,21 Ca	10,92 Ba
0,2-0,4	8,73 Ab	5,06 Cb	5,22 Cb	7,05 Bb
0,4-0,8	6,90 Ac	4,87 Cb	5,09 Cb	5,49 Bc
	CE (dS m ⁻¹)			
0-0,2	0,20 Ca	0,23 Ba	0,24 Ba	0,42 Aa
0,2-0,4	0,16 Bb	0,17 Bb	0,18 Bb	0,24 Ab
0,4-0,8	0,13 Ab	0,15 Ab	0,16 Ab	0,14 Ac
	pH (H ₂ O)			
0-0,2	4,8 Cb	5,2 ABa	5,3 Aa	5,1 Ba
0,2-0,4	4,9 Bb	5,2 Aa	5,2 Aa	5,1 Aa
0,4-0,8	5,3 Aa	5,3 Aa	5,2 Aa	5,2 Aa
	CCF (mmol _c L ⁻¹)			
0-0,2	1,7 Cb	2,2 Ba	2,6 Aa	1,5 Cb
0,2-0,4	1,8 Bb	2,2 Aa	2,3 Ab	1,9 Ba
0,4-0,8	2,0 Aa	2,1 Aa	2,2 Ab	2,1 Aa

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey ($p=0,05$). Média de quatro repetições. MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

4.1.2 Óxidos de ferro, silício e alumínio

A Figura 6 mostra os teores de ferro, silício e alumínio extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, representados respectivamente por Fed, Sid e Ald, referentes aos óxidos livres, e os teores de ferro, silício e alumínio extraídos com oxalato de amônio, representados respectivamente por Feo, Sio e Alo, referentes às formas mal cristalizadas desses elementos no solo nos tratamentos estudados.

Os teores de Fed, Sid e Ald são compatíveis com os teores encontrados em solos similares de tabuleiros (Boulet et al., 1998; Filizola et al., 2001). Estes elementos aumentaram em profundidade nos quatro tratamentos estudados, o que tem sido verificado por outros autores (Silva, 2000; Nunes et al., 2002), devido ao maior teor de argila nas camadas subsuperficiais.

Os solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça apresentam os maiores teores de Fed, Sid e Ald nas camadas de 0,2-0,4m e 0,4-0,8m em relação ao solo da mata, o que indica a maior migração destes compostos nos solos cultivados com cana-de-açúcar. Os maiores teores de óxidos livres nas camadas subsuperficiais nos solos cultivados podem contribuir para um aumento da coesão nestes solos, já que eles agem como agentes cimentantes das partículas do solo (Mckeague & Sprout, 1975). Franzmeier et al. (1996) e Moody & Graham (1997) enfatizaram a importância dos óxidos de ferro, silício e alumínio livres como agentes cimentantes, ao observarem teores mais elevados destes compostos em horizontes adensados.

Os teores de óxidos de ferro, alumínio e silício mal cristalizados (Feo, Alo e Sio) decrescem em profundidade em todos os tratamentos estudados (Figura 6). De acordo com Schwertmann & Kämpf (1983), os maiores teores de Feo na camada superficial ocorre devido a complexação do ferro com a matéria orgânica do solo presente em maior quantidade nesta camada, o que inibe a cristalização dos óxidos.

Apesar do decréscimo em profundidade, os teores de Feo, Alo e Sio foram maiores nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça em relação ao solo da mata nas camadas de 0,2-0,4m e 0,4-0,8m. Estes óxidos podem contribuir para o aumento da coesão do solo, como verificado por Chartres et al. (1990).

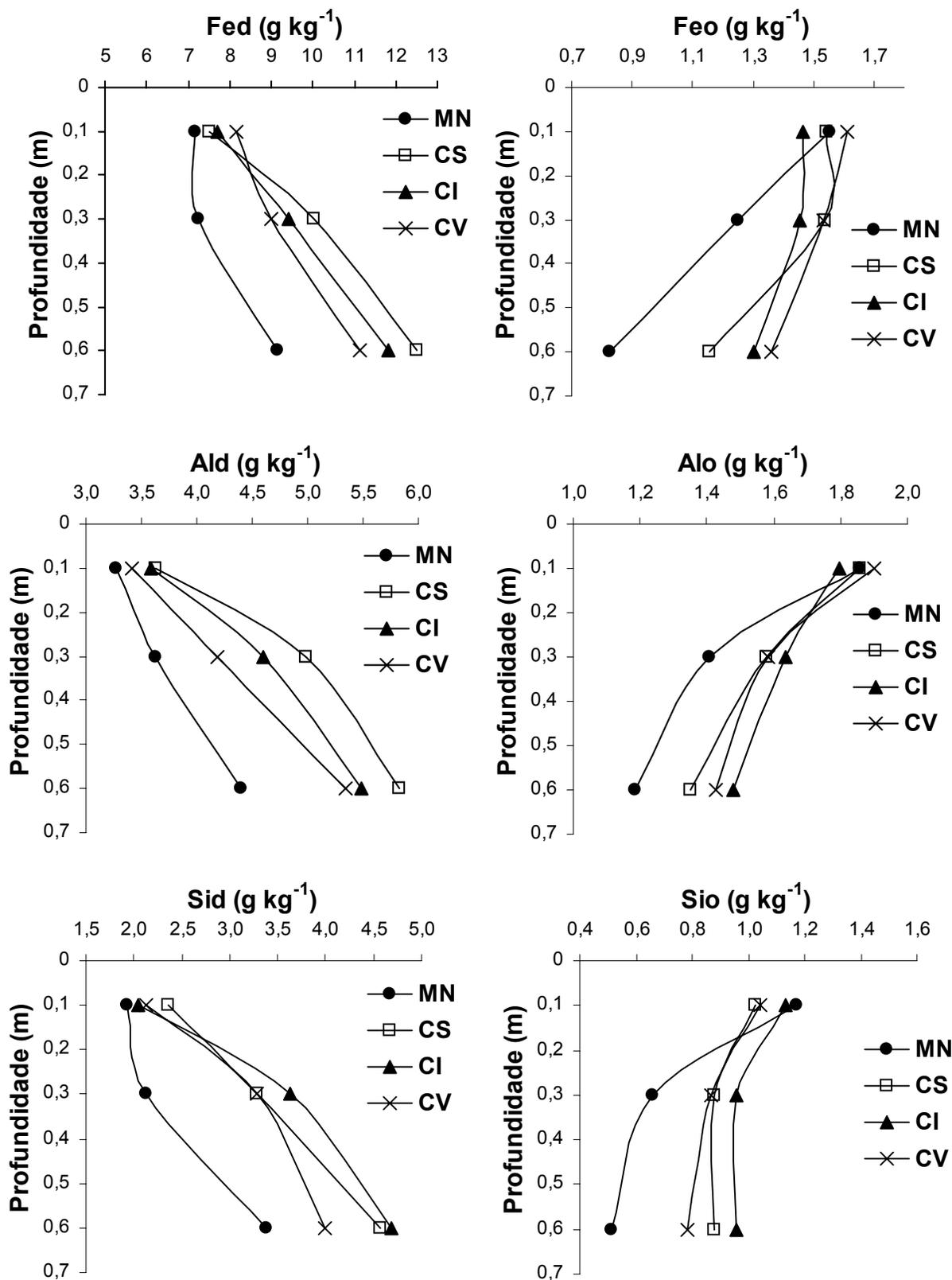


FIGURA 6. Distribuição de Fe, Al e Si ditionito (Fed, Ald e Sid) e Fe, Al e Si oxalato (Feo, Alo e Sio) nos sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV).

4.1.3. Carbono orgânico total e nas frações físicas da matéria orgânica do solo

Houve decréscimo significativo nos teores de carbono orgânico total dos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça em relação ao solo da mata, nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m (Tabela 6). Na camada de 0-0,2m, que apresenta média de carbono orgânico total de 19,87 g kg⁻¹ (Apêndice 4), o solo sob o sistema sequeiro sofreu a maior redução (58%), enquanto o solo com vinhaça sofreu a menor perda, ficando com teor de carbono orgânico total de 22,1 g kg⁻¹.

TABELA 6. Carbono orgânico total, carbono nas frações MO particulada e MO associada aos minerais em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

camada (m)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
Carbono orgânico total (g kg ⁻¹)				
0-0,2	28,1 Aa	11,8 Da	17,5 Ca	22,1 Ba
0,2-0,4	17,1 Ab	8,8 Cab	10,8 Cb	14,1 Bb
0,4-0,8	5,8 Ac	5,8 Ab	6,6 Ac	7,6 Ac
Carbono na MO particulada (g kg ⁻¹)				
0-0,2	8,95 Aa	2,96 Da	4,54 Ca	6,78 Ba
0,2-0,4	3,67 Ab	1,27 Cb	1,37 Cb	2,12 Bb
0,4-0,8	0,69 Ac	0,62 Ab	0,68 Ab	0,65 Ac
Carbono na MO associada aos minerais (g kg ⁻¹)				
0-0,2	19,18 Aa	8,82 Da	12,94 Ca	15,35 Ba
0,2-0,4	13,42 Ab	7,55 Bab	9,23 Bb	11,95 Ab
0,4-0,8	5,07 Cc	5,19 Cb	5,89 Bc	6,99 Ac

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições. MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

A diminuição do carbono orgânico total do solo devido ao cultivo contínuo com cana-de-açúcar tem sido verificada por outros autores (Masilaca et al., 1986; Gomes Jr., 1995). A mobilização do solo com grade aradora na renovação do canavial e a prática da queima da cana-de-açúcar antes da colheita contribuem para perda do carbono orgânico do solo (Mendonza et al., 2000), resultando em prejuízos nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Segundo Greenland et al.

(1992), em regiões tropicais e subtropicais, as perdas de carbono orgânico chegam a cinquenta por cento nos primeiros anos de cultivo. A dificuldade na manutenção de níveis elevados de carbono nos solos cultivados de regiões tropicais é devido às elevadas temperaturas, que estimulam a maior decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana.

O teor de carbono na MO particulada foi significativamente superior no solo sob mata nativa em relação aos outros tratamentos (Tabela 6). O cultivo com a cultura da cana-de-açúcar por longo tempo provocou uma redução de até 67 % nos teores de carbono da MO particulada na camada de 0-0,2m do solo sob o sistema sequeiro, em relação ao solo da mata. Nos solos sob os sistemas irrigado e com vinhaça, os teores de carbono nesta fração reduziram 49 e 24% na camada superficial respectivamente. Reduções da MO particulada também foram verificadas por Blair (2000) em solos caulíníficos cultivados com cana-de-açúcar.

Sendo composta por hifas de fungos, raízes e resíduos animais e vegetais em diversos estágios de decomposição (Golchin et al., 1997), a MO particulada corresponde à fração lábil da matéria orgânica e é muito sensível às mudanças decorrentes das práticas de manejo do solo. A sua importância está relacionada à formação e estabilização dos macroagregados (>250 μm), pois estes são formados pela união de microagregados (Tisdall & Oades, 1982) através de agentes ligantes temporários como raízes, hifas de fungos e resíduos vegetais em decomposição (MO particulada). As alterações nos teores da MO particulada devido ao cultivo podem causar modificações na estabilidade dos macroagregados, podendo refletir na resistência do solo às pressões externas.

Houve redução significativa nos teores de carbono da MO associada aos minerais nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo da mata. A maior redução ocorreu no solo sob o sistema sequeiro, provavelmente devido aos menores teores da MO particulada neste solo. Segundo Blair et al. (1998), a redução do teor da MO particulada devido ao cultivo faz com que os microorganismos utilizem compostos orgânicos complexados às superfícies das frações silte e argila, resultando num decréscimo da MO associada aos minerais. Sendo a vinhaça constituída essencialmente por substâncias húmicas (Cerri et al., 1988; Benke 1998), provavelmente a aplicação deste resíduo por longo tempo contribuiu para a manutenção da MO associada aos minerais na área com vinhaça.

A MO associada aos minerais é a fração estável da matéria orgânica do solo, sendo composta por substâncias húmicas e outras moléculas orgânicas com forte

interação com a superfície das frações silte e argila ($<53\mu\text{m}$), o que a torna mais resistente ao ataque microbiano, exercendo papel importante na estabilização dos microagregados (Cambardella & Elliott, 1992). Esta fração da matéria orgânica, pela sua interação com a matriz do solo, pode promover alterações no limite de plasticidade e umidade ótima de compactação do solo, que são atributos importantes no estudo da compactação do solo.

As diferenças entre os teores de carbono orgânico total e nas frações físicas da matéria orgânica nas três áreas cultivadas podem estar relacionadas, primeiro, às diferenças na adição de carbono orgânico promovida pela aplicação da vinhaça, em relação aos sistemas sequeiro e irrigado; um segundo aspecto seria as diferenças nos valores de matéria seca de raízes produzidas pela cultura nas diferentes condições hídricas e de fertilidade impostas pelos sistemas de sequeiro, irrigado e com vinhaça, resultando em diferenças no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, promovendo retornos orgânicos diferentes ao solo. A implantação de sistemas de manejo com a cultura da cana-de-açúcar que permitam a manutenção da matéria orgânica do solo é essencial na formação e estabilização dos agregados.

4.2. Propriedades físicas do solo

4.2.1. Argila dispersa em água, argila no efluente e fracionamento de argila

Verifica-se um aumento nos valores da argila dispersa em água nos solos cultivados em relação ao solo sob mata nativa nas três camadas estudadas (Tabela 7). O solo sob cultivo irrigado apresentou os maiores valores de argila dispersa em água em todas as camadas estudadas, o que possivelmente está ligada a maior saturação por sódio neste solo. O íon sódio promove um aumento da espessura da dupla camada difusa na solução do solo, diminuindo a atração entre as partículas, resultando numa maior dispersão (Sposito, 1989). Ucha & Ribeiro (1995) também verificaram maiores valores de argila dispersa de solos irrigados em relação a solos sob sequeiro e mata nativa, devido a composição da água de irrigação, que tinha teores de sódio semelhantes ao do presente estudo.

Entre os solos cultivados, o solo com vinhaça apresentou os menores valores

TABELA 7. Argila dispersa em água, argila no efluente e argila total em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

camada (m)	Sistema de Manejo			
	MN	CS	CI	CV
	Argila dispersa em água (g kg ⁻¹)			
0-0,2	96 Ba	112 ABa	131 Ac	108 Ba
0,2-0,4	104 Ca	121 Ba	164 Aa	116 Ba
0,4-0,8	93 Ca	123 Ba	149 Ab	111 Ba
	Argila no efluente (mg L ⁻¹)			
0-0,2	415 Cb	509 Bc	611 Ab	441 Cb
0,2-0,4	533 Ca	787 Bb	1273 Aa	576 Ca
0,4-0,8	577 Ca	867 Ba	1149 Aa	613 Ca
	Argila total (g kg ⁻¹)			
0-0,2	233,9 Ac	212,0 BCc	200,8 Cc	221,1 ABc
0,2-0,4	263,0 Bb	303,1 Ab	312,1 Ab	295,1 Ab
0,4-0,8	411,8 Ca	472,2 ABa	486,1 Aa	453,9 Ba

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições.

MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

de argila dispersa em água, o que provavelmente está relacionado com os maiores teores de cátions considerados floclantes, como cálcio e magnésio, nestes solos. Camargo et al. (1988), verificaram redução nos teores de argila dispersa em solos que receberam vinhaça, comentando que o aumento da concentração salina no solo promovida pela vinhaça reduz a dupla camada difusa, com conseqüente aproximação das partículas do solo. A maior atividade microbiológica em solos que recebem vinhaça, como verificado por Lopes et al. (1986), pode também ter influência na redução da dispersão de argila, devido a produção de mucilagem, que favorece a agregação do solo.

Os resultados de argila dispersa em água corroboram os resultados de concentração crítica de floclação (Tabela 5), que evidenciaram a maior tendência à dispersão dos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado em relação aos outros tratamentos.

A concentração de argila no efluente coletado no ensaio de condutividade hidráulica saturada foi superior no solo irrigado em relação aos demais sistemas de

manejo, indicando maior migração de argila neste solo. Estes resultados estão de acordo com os resultados de argila dispersa em água, que foram superiores no solo irrigado, devido a maior saturação por sódio. Frenkel et al. (1978) também verificaram maior concentração de argila no efluente coletado em colunas com solos cauliniticos devido a sodicidade da água utilizada na irrigação. No presente estudo, o solo com vinhaça apresentou os menores valores de argila no efluente entre os solos cultivados, refletindo os menores valores de argila dispersa em água neste solo.

Verifica-se uma redução significativa nos teores de argila total na camada de 0-0,2m nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça em relação ao solo da mata. A redução do teor de argila na camada superficial resultou num aumento significativo nas camadas 0,2-0,4m e 0,4-0,8m das três áreas cultivadas, com os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentando aumentos mais expressivos. O maior teor de argila nas camadas subsuperficiais nos solos cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo da mata indica uma maior migração de argila nestes solos, o que reflete os maiores teores de argila dispersa.

A movimentação das camadas superficiais do solo em decorrência do seu preparo para o cultivo contribui para um rearranjo de partículas no solo, promovendo a eluviação da fração argila para camadas subsuperficiais (Nielsen et al., 1972). Este fenômeno é mais expressivo em solos cuja argila está num maior grau de dispersão, migrando facilmente sob condições de chuva ou irrigação (Helalia et al., 1988)

Na Figura 7, verifica-se um aumento da razão argila fina/argila total em profundidade em todos os tratamentos estudados, com valores máximos na camada de 0,4-0,8m. O aumento desta razão da camada de 0-0,2m para as camadas de 0,2-0,4m e 0,4-0,8m indica a ocorrência de processos de translocação vertical de argila ao longo do perfil do solo (Floate, 1966; Cabrera-Martinez, 1989). Os maiores valores da razão argila fina/argila total na camada de 0,4-0,8m em todos os solos estudados é constatada pela presença expressiva de cerosidade nesta camada na descrição do perfil do solo em campo.

O solo irrigado apresentou o menor valor da razão argila fina/argila total na camada 0-0,2m, o que é resultado da maior eluviação da fração argila fina para as camadas subsuperficiais deste solo, devido aos maiores valores de argila dispersa

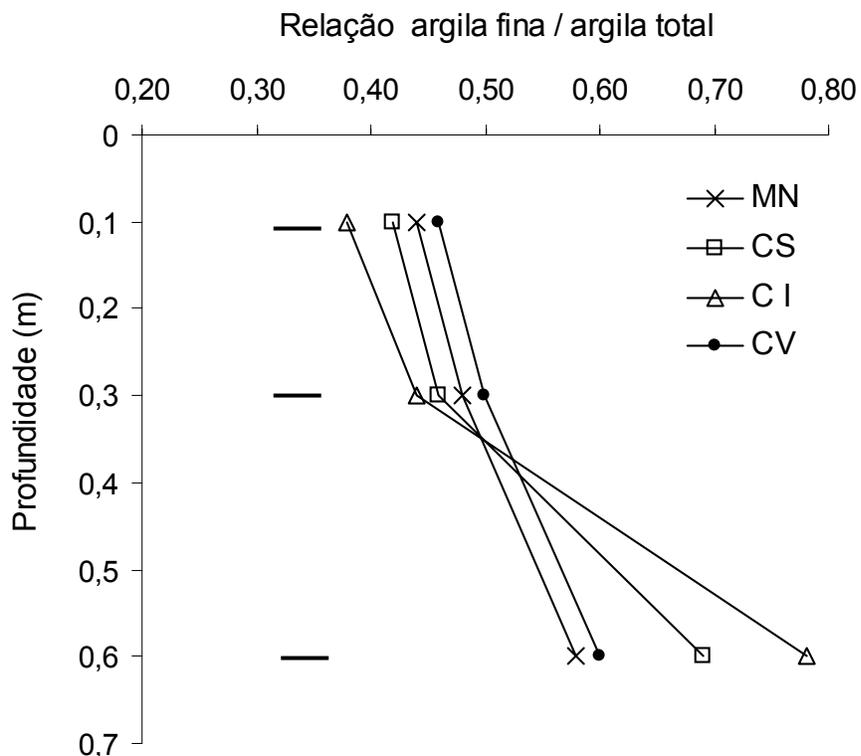


FIGURA 7. Relação argila fina / argila total nos solos sob os sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV). Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% e comparam médias dos sistemas de manejo em cada profundidade.

em água. Os maiores valores desta razão nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado na camada de 0,4-0,8m indicam a maior migração de argila fina para camadas subsuperficiais destes solos.

O maior acúmulo de argila nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados podem ter contribuído para o aumento dos teores de Fed, Ald e Sid em profundidade nestes solos. Os teores de argila correlacionaram-se com os teores de Fed ($r = 0,82^{**}$), Ald ($r=0,90^{**}$) e Sid ($r=0,82^{**}$), indicando que uma proporção dos óxidos livres encontra-se associada a fração argila, havendo co-migração para as camadas subsuperficiais. A correlação entre argila e óxidos indicando a co-migração para horizontes subsuperficiais tem sido verificada por outros autores (Gianluppi, 1979; Nunes et al., 2002).

O aumento dos teores de argila e óxidos em profundidade pode promover um aumento da coesão dos solos de tabuleiros, já que estes atributos influenciam a coesão do solo (Kimpfe et al., 1983; Chartres et al., 1990). A maior migração de argila nos solos cultivados também pode contribuir para o aumento da

microporosidade nas camadas subsuperficiais (Azooz et al., 1996; Startsev & McNabb, 2001), devido ao preenchimento de poros, e promover um adensamento dessas camadas (Silva et al., 1998).

4.2.2. Limites de consistência e parâmetros da curva de compactação do solo

Houve efeito significativo dos sistemas de manejo no limite de plasticidade do solo, com os solos sob os sistemas mata nativa e com vinhaça apresentando os maiores valores desse limite nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m (Tabela 8). Verifica-se também um aumento nos valores do limite de plasticidade em profundidade nos quatro sistemas de manejo estudados, possivelmente devido ao aumento do teor de argila em profundidade.

Os teores de água correspondentes aos limites de contração não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de manejo e profundidades (Apêndice 5), com valores variando entre 0,10 e 0,11 kg kg⁻¹.

Os maiores valores do limite de plasticidade nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m dos solos sob os sistemas mata nativa e com vinhaça refletem os maiores teores de carbono orgânico total verificados nestes dois solos. A Figura 8 mostra que houve correlação positiva entre o limite de plasticidade com o teor de carbono orgânico total do solo. Segundo Baver (1966), como a matéria orgânica tem grande poder de retenção de água, uma maior quantidade de água se faz necessário para formação de filmes de água ao redor das partículas minerais, aumentando o teor de água necessário para o solo apresentar um comportamento plástico. Smith et al. (1985) verificaram correlações positivas e significativas entre os limites de consistência (plasticidade e liquidez) e a matéria orgânica em solos caulíníticos de Israel. Segundo os autores, a matéria orgânica aumenta a área superficial específica do solo, levando a um acréscimo na retenção de água e conseqüente aumento nos teores de água correspondentes aos limites de plasticidade e liquidez.

O aumento dos problemas de compactação dos solos cultivados está associado, entre outros fatores, à ausência de um programa de trabalho bem definido, que leve em consideração a umidade ideal para as atividades de preparo do solo e colheita das culturas. A faixa de umidade entre os limites de contração e plasticidade do solo é conhecida como faixa de friabilidade. Esta faixa de umidade

TABELA 8. Valores médios de umidade do solo nos limites de plasticidade (LP) e contração (LC), e faixa de friabilidade do solo em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

Camada (m)	Sistema de Manejo			
	MN	CS	CI	CV
	LP (kg kg ⁻¹)			
0–0,2	0,194 Aa	0,136 Bc	0,146 Bc	0,184 Ab
0,2–0,4	0,193 Aa	0,156 Bb	0,167 Bb	0,193 Ab
0,4–0,8	0,220 Aa	0,227 Aa	0,231 Aa	0,223 Aa
	LC (kg kg ⁻¹)			
0–0,2	0,111	0,106	0,110	0,112
0,2–0,4	0,110	0,110	0,109	0,110
0,4–0,8	0,102	0,107	0,104	0,101
	Faixa de Friabilidade (kg kg ⁻¹)			
0–0,2	0,083 Ab	0,030 Bb	0,036 Bb	0,072 Ab
0,2–0,4	0,083 Ab	0,046 Bb	0,058 ABb	0,083 Ab
0,4–0,8	0,118 Aa	0,121 Aa	0,127 Aa	0,122 Aa

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições.

MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

tem sido definida pela literatura (Hillel, 1980) como sendo a faixa de umidade na qual as operações de preparo do solo devem ser realizadas.

Os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentaram as menores faixas de friabilidade nas camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m em relação aos outros sistemas de manejo (Tabela 8), o que ocorreu devido à redução dos limites de plasticidades, como consequência dos menores valores de carbono orgânico total nestes dois sistemas de manejo.

A menor faixa de friabilidade nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado é um fator desfavorável para estes solos, já que eles tem reduzida a faixa de umidade correspondente a trabalhabilidade, aumentando os riscos à compactação, pois há maior probabilidade das operações com máquinas agrícolas ocorrerem fora dessa faixa de umidade ideal de trabalho. Este fato é importante quando se considera que muitas vezes as condições adequadas de umidade não são respeitadas devido às

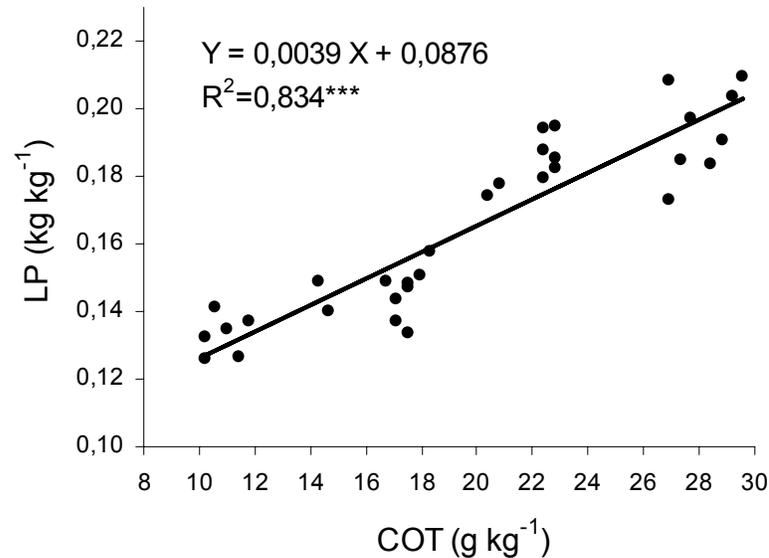


FIGURA 8. Relação entre o limite de plasticidade (LP) e o carbono orgânico total do solo (COT) nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m.

necessidades de se cumprir um cronograma de atividades. No caso da cana-de-açúcar, após ter sido realizada a colheita manual, a cana deve ser levada à usina para moagem num prazo máximo de 36 horas (Paranhos, 1987), para minimizar a degradação dos colmos, o que pode, na tentativa de atender um cronograma de atividades, resultar em tráfego de máquinas em condições de umidade inadequada, acima da faixa de friabilidade.

O conhecimento dos teores de água correspondentes aos limites de consistência do solo e da faixa de umidade correspondente a sua friabilidade são fatores importantes para as atividades agrícolas, pois permitem determinar a umidade adequada de trabalho. No entanto, estas informações não são suficientes para impedir os problemas de compactação do solo, visto que não permitem inferir sobre quais as pressões que o solo pode suportar dentro dessa faixa de umidade. Problemas de compactação poderão existir dentro da faixa de friabilidade se, junto com o teor de água, não for determinada a capacidade de suporte de carga do solo, a qual é obtida pela determinação da pressão de precompactação do solo.

As curvas de compactação obtidas pelo ensaio de Proctor normal para os tratamentos estudados são apresentadas na Figura 9. Os valores de umidade ótima de compactação e densidade máxima de compactação extraídos das curvas são apresentados na Tabela 9, e a média dos dados no Apêndice 6. Os efeitos dos

sistemas de manejo nos parâmetros de compactação foram significativos apenas na camada de 0-0,2m.

Os solos sob os sistemas mata nativa e com vinhaça apresentaram os maiores valores de umidade ótima de compactação e os menores valores de densidade máxima de compactação na camada superficial (Tabela 9). Este resultado provavelmente reflete os maiores teores de matéria orgânica nestes dois solos. O aumento da umidade ótima de compactação em profundidade reflete os maiores teores de argila nas camadas subsuperficiais.

A curva de compactação é influenciada por atributos como teor de argila, areia e matéria orgânica do solo (Hillel, 1980). Solos com maior teor de argila e matéria orgânica apresentam valores de umidade ótima de compactação mais elevados (Howard et al., 1981). A grande capacidade de retenção de água da matéria orgânica reduz a quantidade de água entre as partículas minerais do solo, sendo necessário um maior teor de água para que a densidade máxima do solo seja atingida (Camargo & Alleoni, 1997). A curva de compactação, no entanto, não mede o efeito da estrutura do solo, pois são utilizadas amostras destorroadas no ensaio de Proctor, que foi desenvolvido para estudar a condição ideal de umidade para a compactação de estradas e aterros, visando aumentar a resistência do solo (Pinto, 2000).

Os solos cultivados sob os sistemas sequeiro e irrigado sofreram uma redução significativa nos valores de umidade ótima de compactação (Tabela 9), o que provavelmente é resultado da perda mais expressiva da matéria orgânica nestes dois solos em relação ao solo da mata. Estes solos, portanto, podem sofrer a compactação máxima mesmo quando são trabalhados com teores de água mais baixos, necessitando de maior atenção nas atividades de preparo do solo e na colheita da cana-de-açúcar.

Mudanças nos parâmetros de compactabilidade do solo devido às alterações nos teores de matéria orgânica provocadas por diferentes sistemas de manejo têm sido enfatizadas na literatura (Dias Júnior & Estanislau, 1999; Barzegar et al., 2000; Diaz-Zorita & Grosso, 2000). Thomas et al. (1996) verificaram aumento na compactabilidade de solo de textura média cultivado com soja devido a uma pequena diferença no teor de carbono orgânico (1,99 % no plantio direto e 1,27 % no preparo convencional), o que proporcionou um aumento da densidade máxima

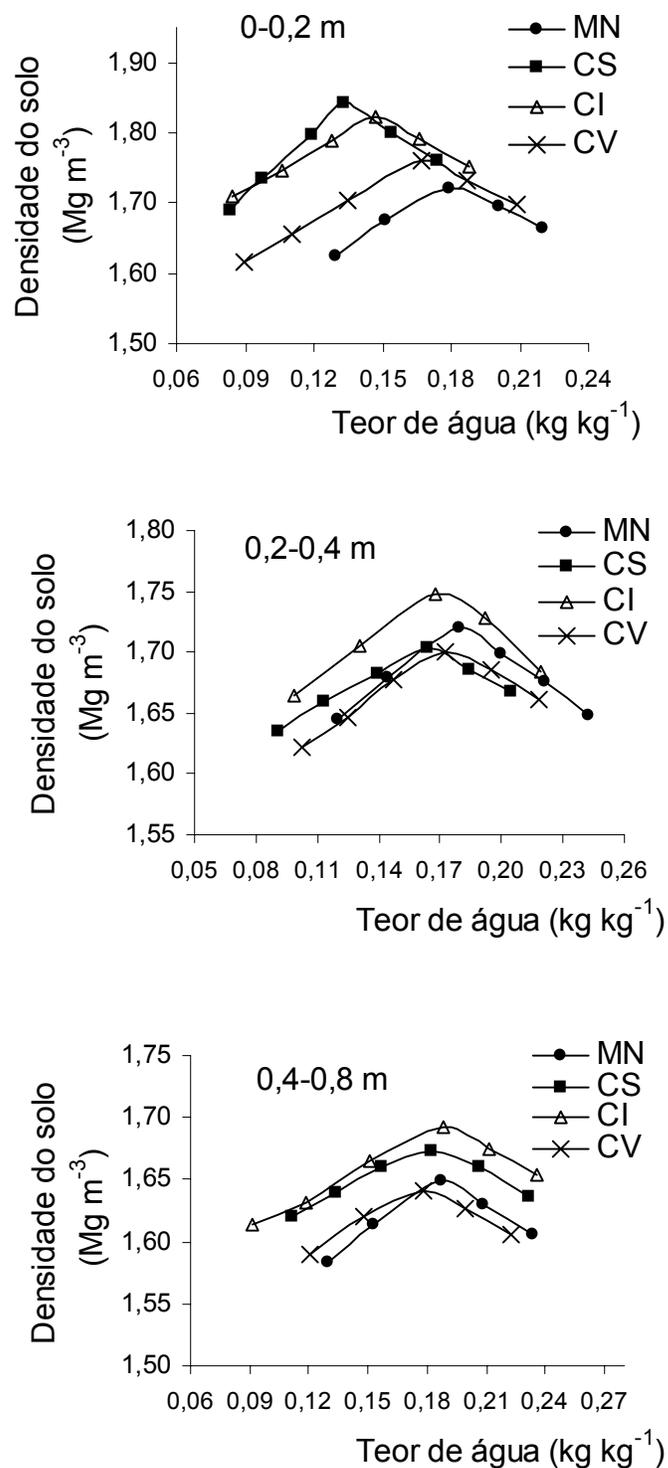


FIGURA 9. Curvas de compactação do solo (densidade do solo X teor de água) em função dos sistemas de manejo mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV), nas profundidades estudadas.

TABELA 9. Umidade ótima de compactação (Uót) e densidade máxima de compactação (Dmáx) obtidos pelo ensaio de Proctor normal para os diferentes sistemas de manejo e profundidades.

camada	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
m	Uót (kg kg ⁻¹)			
0-0,2	0,179 Aa	0,133 Cb	0,147 Bc	0,167 Aa
0,2-0,4	0,179 Aa	0,164 Ab	0,167 Ab	0,172 Aa
0,4-0,8	0,188 Aa	0,182 Aa	0,188 Aa	0,178 Aa
	Dmáx (Mg m ⁻³)			
0-0,2	1,72 Ca	1,84 Aa	1,82 ABa	1,76 BCa
0,2-0,4	1,72 Aa	1,70 Ab	1,75 Ab	1,70 Aab
0,4-0,8	1,65 Aa	1,67 Ab	1,69 Ab	1,64 Ab

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de três repetições.

MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

de 1,58 Mg m³ para 1,82 Mg m³ e redução da umidade ótima de compactação de 0,21 kg kg⁻¹ para 0,14 kg kg⁻¹ do sistema plantio direto para o preparo convencional respectivamente.

4.2.3 Densidade do solo

Verificam-se aumentos significativos nos valores de densidade do solo nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa (Tabela 10), o que possivelmente estão relacionados ao tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo. Cerri et al. (1991) também verificaram aumentos de densidade de Latossolos de Piracicaba cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa, associando a compactação do solo ao tráfego de máquinas nas atividades agrícolas.

Considerando o conceito de grau de compactação do solo, que é a relação entre a densidade do solo e a densidade máxima obtida através da curva de compactação do solo (Caputo, 1988), os valores de densidade do solo na camada de 0-0,2m correspondem a graus de compactação de 75,0, 87,5, 84,6 e 80,7%

nos solos sob os sistemas mata nativa, sequeiro, irrigado e com vinhaça respectivamente, verificando-se o maior estado de compactação nos solos cultivados com cana-de-açúcar.

TABELA 10. Densidade do solo (Ds) em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

camada (m)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
	Ds (Mg m ⁻³)			
0-0,2	1,29 Cb	1,61 Aa	1,54 ABa	1,42 Ba
0,2-0,4	1,41 Ca	1,53 ABa	1,65 Aa	1,44 Ba
0,4-0,8	1,38 Ba	1,55 Aa	1,62 Aa	1,39 Ba

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições. MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

Na camada de 0,2-0,4m, o aumento da densidade do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar pode está relacionado não só ao tráfego de máquinas na superfície do solo, onde os efeitos da pressão dos pneus podem atingir profundidades maiores (Hakansson & Reeder, 1994), como também devido à pressão exercida pela grade pesada utilizada nas operações de preparo do solo. Segundo Montovani (1990), as grades pesadas são implementos que podem causar compactação em camadas subsuperficiais, em decorrência da grande pressão que exercem no solo.

As diferenças na densidade do solo entre as áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça, provavelmente, estão relacionadas com dois fatores: o primeiro consiste na diferença de desenvolvimento do sistema radicular da cultura nas diferentes condições de desenvolvimento da planta (sequeiro, irrigado e com vinhaça), já que as operações de preparo do solo e da colheita são as mesmas nas três áreas cultivadas. O segundo fator importante está no fato que os valores de umidade ótima de compactação (Tabela 9) e faixa de friabilidade (Tabela 8) dos solos sobre os sistemas sequeiro e irrigado foram menores, o que aumentou os riscos à compactação nestes solos.

Os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentaram os maiores valores de densidade do solo na camada de 0,4-0,8m em relação ao solo da mata, indicando que os efeitos das atividades de cultivo atingiram esta camada. O tráfego

de máquinas pesadas na área cultivada, principalmente por ocasião da colheita, quando caminhões carregados com cana-de-açúcar atingem uma massa de 26000 kg, provavelmente contribui para a compactação em profundidade. Barbieri et al. (1997), estudando os efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo para cana-de-açúcar em um Latossolo Roxo, verificaram que a compactação do solo atingiu a profundidade de 0,6 m, principalmente no preparo com grades pesadas.

O aumento dos teores de argila nas camadas subsuperficiais dos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado em relação ao solo sob mata nativa, possivelmente contribuiu para o adensamento destes solos. Mitchell (1976) enfatiza que a argila dispersa migra através do perfil do solo e preenche os espaços porosos entre as unidades estruturais e grãos de areia, podendo aumentar expressivamente a densidade do solo de camadas subsuperficiais.

4.2.4. Porosidade e retenção de água no solo

Houve redução significativa na porosidade total dos solos cultivados sob os sistemas sequeiro e irrigado nas três camadas estudadas, e no solo com vinhaça apenas na camada de 0-0,2m, em relação ao solo sob mata nativa (Tabela 11). Esta redução na porosidade total do solo reflete as mudanças na distribuição de diâmetro de poros devido ao cultivo nas áreas estudadas.

Verifica-se uma redução significativa nos valores dos poros de diâmetro $\phi > 1000 \mu\text{m}$ e de diâmetro $50 \leq \phi \leq 1000 \mu\text{m}$ nas três áreas cultivadas em relação ao solo da mata, nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m. A redução dos poros de maior diâmetro nas áreas cultivadas reflete a maior compactação destes solos, devido ao tráfego de máquinas nas atividades de cultivo da cana-de-açúcar, principalmente na colheita, quando caminhões e carregadeiras trafegam na área cultivada. Segundo Hill et al. (1985), a compactação do solo devido ao cultivo ocorre principalmente devido ao colapso dos poros de maior diâmetro. Os efeitos negativos do cultivo na fauna do solo provavelmente contribuíram para a diminuição dos poros de diâmetro $\phi > 1000 \mu\text{m}$, já que grande parte desta classe de poros é de origem biológica (Hole, 1981).

Entre os solos cultivados sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça, os maiores valores dos poros de maior diâmetro ($\phi > 1000 \mu\text{m}$ e $50 \leq \phi \leq 1000 \mu\text{m}$) ocorreram no solo com vinhaça, o que provavelmente está relacionado ao melhor

TABELA 11. Porosidade total e distribuição de diâmetro de poros em função dos sistemas de manejo e profundidades estudados.

Camada (m)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
poros $\phi \geq 1000\mu\text{m}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,2	0,031 Aa	0,005 Cab	0,008 Ca	0,018 Ba
0,2-0,4	0,021 Ab	0,007 Ba	0,005 Bab	0,010 Bb
0,4-0,8	0,008 Ac	0,003 Ab	0,003 Ab	0,005 Ac
poros $50 \leq \phi < 1000 \mu\text{m}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,2	0,229 Aa	0,103 Da	0,128 Ca	0,156 Ba
0,2-0,4	0,195 Ab	0,103 Ca	0,079 Db	0,135 Bb
0,4-0,8	0,146 Ac	0,081 Cb	0,057 Dc	0,120 Bc
poros $0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,2	0,155 Bb	0,192 Ab	0,179 Ab	0,178 Ab
0,2-0,4	0,144 Cb	0,179 Ab	0,160 Bc	0,173 ABb
0,4-0,8	0,228 Ba	0,222 Ba	0,207 Ca	0,243 Aa
poros $\phi \leq 0,2\mu\text{m}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,2	0,094 Ab	0,105 Ac	0,108 Ac	0,109 Ab
0,2-0,4	0,113 Ca	0,138 Ba	0,162 Aa	0,137 Ba
0,4-0,8	0,103 Cab	0,116 Bb	0,143 Ab	0,111 BCb
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
0-0,2	0,509 Aa	0,405 Cb	0,423 Ca	0,461 Ba
0,2-0,4	0,473 Ab	0,427 Ba	0,406 Ca	0,455 Aa
0,4-0,8	0,485 Ab	0,422 Ba	0,410 Ba	0,479 Aa

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5 %). Média de 6 repetições.

MN = mata nativa, CS= sequeiro, CI= irrigado, CV= vinhaça

desenvolvimento do sistema radicular da cultura neste sistema de manejo, que responde às melhores condições químicas do solo promovida pela vinhaça.

Como consequência da redução dos poros de maior diâmetro, há um acréscimo significativo dos poros de diâmetro $0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$ nas camadas 0-0,2m e 0,2-0,4m dos solos cultivados com cana-de-açúcar. A não diferença significativa nos valores dos poros com diâmetro $\phi \leq 0,2 \mu\text{m}$ entre os tratamentos na camada de 0,0-0,2m indica que a mudança na distribuição de poros nesta camada ocorreu com a redução dos macroporos para um aumento na porosidade de tamanho intermediário ($0,2 < \phi < 50 \mu\text{m}$).

Na camada de 0,2-0,4m, houve um aumento dos poros de diâmetro $\phi \leq 0,2 \mu\text{m}$ nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça, e na camada de 0,4-0,8m apenas nos solos sob sequeiro e irrigado. Os maiores valores desta classe de poros nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados podem estar relacionados, além da compactação do solo, ao preenchimento dos poros de maior diâmetro com argila iluvial. De acordo com Startsev & McNabb (2001), a argila dispersa em solos cultivados pode resultar numa microporosidade adicional em camadas subsuperficiais, devido ao preenchimento dos macroporos com argila iluvial. No presente estudo, os maiores valores de argila dispersa e o acúmulo de argila nas camadas subsuperficiais, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, possivelmente contribuíram para a diminuição dos poros de maior diâmetro, e conseqüente aumento do adensamento nestas camadas.

As mudanças na distribuição de diâmetro de poros do solo devido ao cultivo refletiram em alterações na retenção de água do solo. As Figuras 10a, 10b e 10c mostram as curvas características de água dos solos sob os diferentes sistemas de manejo nas profundidades estudadas, e no Apêndice 7 encontram-se os parâmetros da equação de ajuste das curvas.

Nas três camadas estudadas, verifica-se valores superiores de retenção de água nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça entre os potenciais matriciais de -6 e -1500 kPa, em relação ao solo sob mata nativa. Esta maior retenção de água nos solos cultivados entre as tensões -6 e -1500 kPa ocorre devido ao maior volume de poros com diâmetro menor que $50 \mu\text{m}$, como resultado da compactação do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

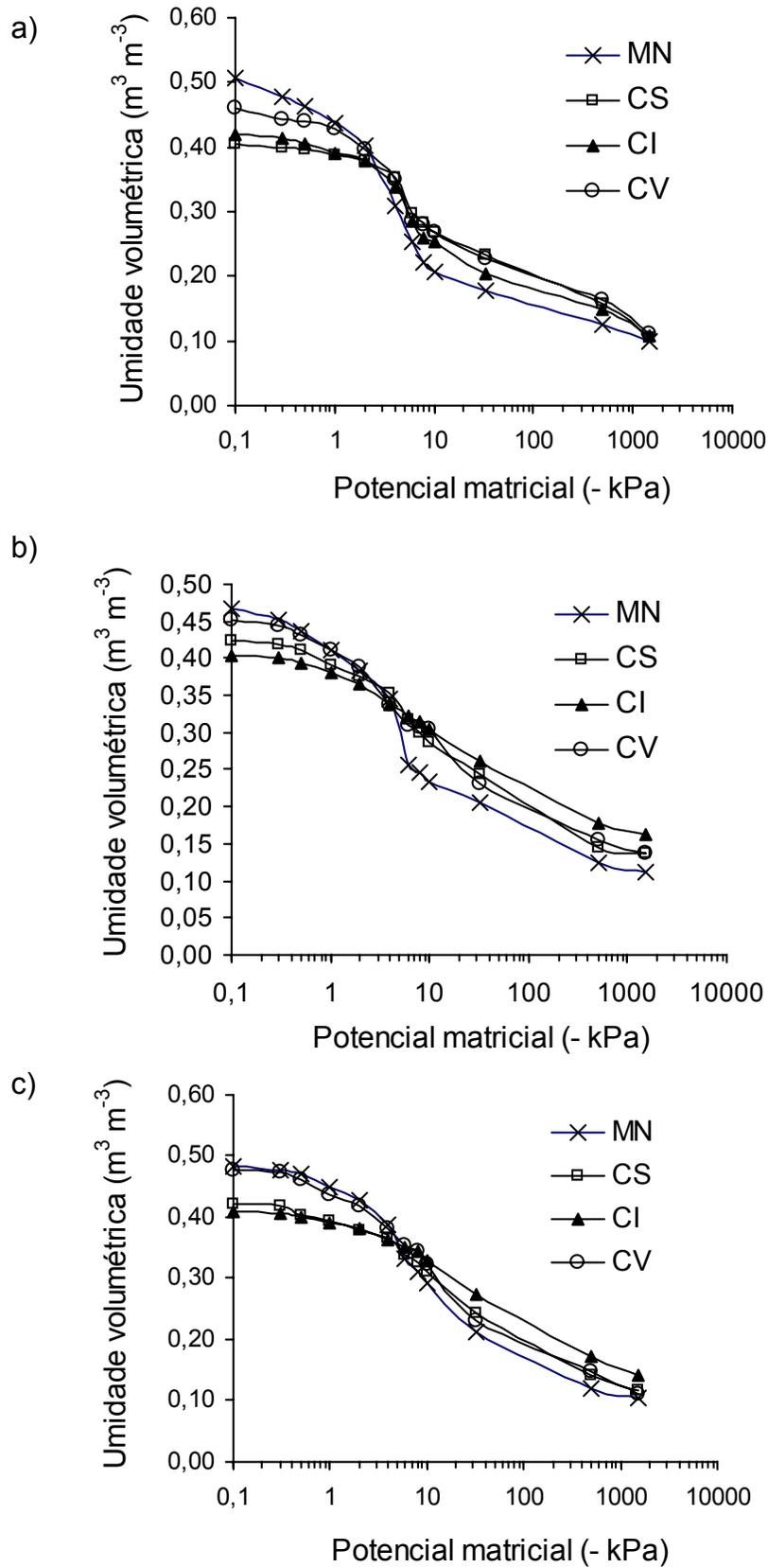


FIGURA 10. Curvas características de água do solo nas camadas a) 0-0,2m, b) 0,2-0,4m e c) 0,4-0,8m dos solos sob os sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), Irrigado (CI) e com vinhaça (CV).

As diferenças de retenção de água dos solos sob o mesmo potencial matricial comprovam as mudanças na distribuição de diâmetro de poros desses solos (Baver, 1966). Poros com diâmetro entre 0,2 e 15 μm são assumidos na literatura como poros de retenção de água para as plantas (Hill et al., 1985). O aumento nos teores de água entre os potenciais -6 e -1500 kPa sugere que mais água pode ser retida para ser absorvida pelas plantas nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar. A maior retenção de água em solos cultivados devido às modificações na distribuição de diâmetro dos poros também foram verificados por outros autores (Hill et al., 1985; Carvalho et al., 1991).

4.2.5 Condutividade hidráulica saturada

Os valores de condutividade hidráulica saturada reduziram significativamente nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m, em relação ao solo sob mata nativa (Figura 11). A redução da condutividade hidráulica saturada do solo nas áreas cultivadas reflete a redução dos poros de maior diâmetro ($\phi \geq 50 \mu\text{m}$) (Tabela 11). Estes poros são responsáveis pela aeração e pela drenagem da água no perfil do solo (Hillel, 1980), e a sua influência na condutividade hidráulica saturada tem sido verificada na literatura (Logsdon et al., 1990; Azooz et al., 1996).

Não houve diferença significativa nos valores de condutividade hidráulica saturada entre os solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça na camada de 0-0,2 m, apesar dos maiores valores de poros com diâmetro $\phi \geq 50 \mu\text{m}$ no solo com vinhaça, o que pode indicar mudanças na geometria e continuidade dos poros dos solos cultivados em relação ao solo da mata. A condutividade hidráulica saturada depende não só da distribuição de diâmetro dos poros como também da geometria, orientação e continuidade desses poros no solo (Marsili et al., 1998; Wiermann et al., 2000).

Na camada de 0,4-0,8m, os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentaram os menores valores de condutividade hidráulica saturada, provavelmente refletindo os maiores valores de poros com diâmetro $\phi < 50 \mu\text{m}$. O aumento do teor de argila na camada de 0,4-0,8 m destes solos em relação ao da mata (Tabela 7), possivelmente contribuiu para a menor condutividade hidráulica do

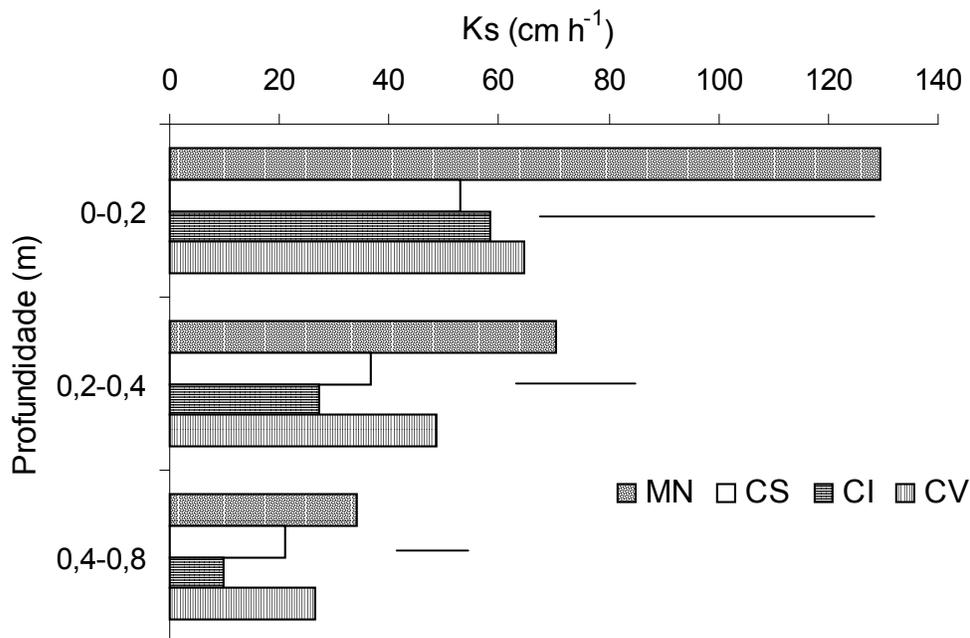


FIGURA 11. Condutividade hidráulica saturada (K_s) em função dos sistemas de manejo mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV), nas profundidades estudadas. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% e comparam médias dos sistemas de manejo em cada profundidade.

solo, como reflexo do preenchimento e obstrução dos poros destas camadas. Frenkel et al. (1978) verificaram que a redução da condutividade hidráulica saturada de solos caulíníticos ocorreu como conseqüência do preenchimento de poros por partículas de argila dispersa em água.

4.2.6 Distribuição de classes de agregados e resistência dos agregados à ruptura.

A distribuição de agregados obtida por peneiragem via seca mostra pouca diferença entre os sistemas de manejo dentro de cada classe de agregados, com mais de 57% dos agregados sendo da classe $> 2\text{mm}$ nos quatro sistemas de manejo estudados (Tabela 12). Na distribuição de agregados obtida por peneiragem via úmida, no entanto, observa-se uma redução dos valores dos agregados de maior diâmetro ($>2\text{mm}$ e $2-1\text{mm}$) nas camadas de $0-0,2\text{m}$ e $0,2-0,4\text{m}$ nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

TABELA 12. Distribuição percentual de classes de agregados do solo obtidos por peneiragem via seca e por via úmida nos sistemas de manejo e profundidades estudados.

Diâmetro da classe mm	Sistema de manejo							
	MN	CS	CI	CV	MN	CS	CI	CV
	-----Seco-----				-----Úmido-----			
	-----%-----							
	camada 0-0,2 m							
>2	60,5	57,3	58,0	58,0	45,8	26,4	31,5	37,7
2 - 1	16,7	17,1	16,4	18,7	16,0	11,5	11,3	16,4
1 - 0,25	14,2	17,2	17,0	15,2	18,0	29,6	28,5	21,8
0,25 - 0,10	2,6	3,6	2,6	3,1	8,3	11,4	10,7	12,3
0,10 - 0,053	3,1	2,9	3,4	2,7	7,5	10,8	11,6	7,7
<0,053	2,8	2,0	2,6	2,2	4,4	10,4	6,5	4,1
	camada 0,2-0,4 m							
>2	59,7	57,3	57,0	57,5	34,8	19,7	23,9	30,8
2 - 1	17,1	16,0	15,6	16,3	16,3	14,2	11,9	15,5
1 - 0,25	14,9	17,8	18,9	18,5	17,2	29,9	29,1	21,4
0,25 - 0,10	2,8	3,5	2,3	3,2	9,3	16,8	14,1	10,8
0,10 - 0,053	2,3	3,7	4,3	2,6	9,2	15,0	12,1	10,9
<0,053	3,2	1,7	1,9	1,8	13,2	4,4	8,8	10,5
	camada 0,4-0,8 m							
>2	56,1	56,2	56,6	57,4	25,1	23,9	23,7	26,3
2 - 1	15,6	14,1	14,6	14,2	16,4	16,2	18,7	17,0
1 - 0,25	20,8	22,2	21,8	21,0	24,0	24,7	23,8	21,2
0,25 - 0,10	1,7	2,1	2,3	1,8	11,7	12,8	14,9	13,8
0,10 - 0,053	1,5	2,3	2,4	2,3	13,6	14,2	12,4	12,9
<0,053	4,4	3,0	2,4	3,3	9,2	8,1	6,5	8,7

MN = mata nativa, CS = sequeiro, CI = irrigado, CV = vinhaça

Verifica-se portanto, que os agregados da classe >2mm obtidos por via seca, que são elevados em todos os tratamentos, quando são submetidos à peneiragem por via úmida, são fragmentados em unidades menores, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça. Isto mostra que os agregados nos solos cultivados com cana-de-açúcar não são tão estáveis em água quanto os agregados do solo da mata, devido à redução do teor de matéria orgânica do solo. No solo com vinhaça, entretanto, este efeito foi menor, provavelmente devido aos efeitos da vinhaça aplicada. Segundo Camargo et al. (1988), a vinhaça exerce um efeito benéfico para agregação do solo devido à produção de mucilagens, como consequência da maior atividade microbiana em solos tratados com este resíduo.

A menor estabilidade em água dos agregados de solos submetidos às atividades de cultivo também foi verificada por outros autores (Roth et al., 1991; Silva, 1993). De acordo com Tisdall & Oades (1982), o acúmulo de agregados de menor diâmetro é resultado da maior resistência desses agregados às práticas do manejo, pois os agentes ligantes que estabilizam estes agregados menores são persistentes, formados por substâncias húmicas associadas aos óxidos de ferro e alumínio, enquanto os macroagregados (>250 μ m) são mais afetados pelas práticas do manejo, pois são ligados por agentes temporários como hifas de fungo e raízes de plantas.

A Tabela 13 mostra os valores do diâmetro médio ponderado obtidos por peneiragem via seca (DMPseco) e úmida (DMPúmido), que apresentaram média geral de 3,68 mm e 2,09 mm respectivamente.

Não houve diferença significativa entre os valores de DMPseco dos quatro sistemas de manejo estudados e nem entre as camadas estudadas (Tabela 13 e Apêndice 8). Esta pouca diferenciação entre os valores de DMPseco não foi verificada com os valores de DMPúmido, havendo uma redução significativa nos valores do diâmetro médio dos agregados obtidos por via úmida nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça, em relação ao solo sob mata nativa. Estes resultados mostram que, apesar dos solos cultivados com cana-de-açúcar apresentarem valores de DMPseco semelhantes ao solo da mata, os agregados se apresentam mais susceptíveis à desagregação quando são umedecidos, apresentando valores de DMPúmido menores que os agregados do solo da mata.

A redução do DMPúmido dos agregados nos solos cultivados, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, reflete os menores teores de carbono orgânico total devido ao cultivo. Na Figura 12 observa-se a correlação positiva e significativa entre o DMPúmido e o carbono orgânico total dos solos estudados. Outros atributos apresentaram correlação positiva com o DMPúmido, como Ca^{2+} ($r=0,83^{**}$), Mg^{2+} ($r=0,78^{**}$), matéria seca de raízes ($r=0,71^{**}$) e MO particulada ($r=0,86^{**}$). Estes atributos são enfatizados na literatura como importantes para estabilização dos agregados no solo (Roth et al., 1991; Rachid et al., 2001).

O cultivo intensivo da cana-de-açúcar com a queima da palha por ocasião da colheita resulta na perda de toneladas de resíduos (Blair, 2000), resultando em decréscimo da matéria orgânica do solo (Silva & Ribeiro, 1992; Bal-Coelho et al., 1993) e da atividade microbiana (Mendonza et al., 2000) e, como consequência, na

TABELA 13. Valores de diâmetro médio ponderado obtidos por peneiragem via seca (DMPseco), via úmida (DMPúmido) e resistência dos agregados à ruptura nos tratamentos estudados.

Camada (m)	Sistema de Manejo			
	MN	CS	CI	CV
	DMPseco (mm)			
0-0,2	3,83	3,67	3,70	3,72
0,2-0,4	3,79	3,66	3,64	3,68
0,4-0,8	3,62	3,59	3,62	3,65
	DMPúmido (mm)			
0-0,2	3,01 Aa	1,91 Da	2,19 Ca	2,58 Ba
0,2-0,4	2,44 Ab	1,58 Bb	1,78 ABb	2,15 ABa
0,4-0,8	1,87 Ac	1,81 Aa	1,83 Ab	1,94 Aa
	Resistência dos agregados à ruptura (kPa)			
0-0,2	121,3 Cc	156,7 Ab	161,7 Ab	145,6 Bc
0,2-0,4	133,8 Bb	158,7 Ab	163,0 Aab	156,5 Ab
0,4-0,8	150,6 Ba	166,9 Aa	171,5 Aa	164,8 Aa

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%).

MN = mata nativa, CS = sequeiro, CI = irrigado, CV = vinhaça

redução da estabilidade dos agregados, além de reduzir a proteção do solo contra a ação direta do impacto das gotas de chuva, que também tem um efeito de desagregação. No presente estudo, a prática da queima é utilizada nos três sistemas de manejo com cana-de-açúcar estudados. No solo com vinhaça, no entanto, apesar da queima da cana-de-açúcar, a aplicação deste resíduo proporcionou menor redução nos valores de DMPúmido em relação ao solo sob mata nativa.

Houve um aumento significativo nos valores de resistência dos agregados à ruptura nos solos cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo da mata nas três camadas estudadas (Tabela 13). A maior resistência dos agregados nos solos cultivados provavelmente está relacionada a maior compactação destes solos, que resulta em agregados mais densos (Roth et al., 1991). Estes resultados estão de acordo com os verificados por Chan & Hulugalle (1999), que verificaram um aumento da resistência dos agregados à ruptura de 74 kPa para 143 kPa na

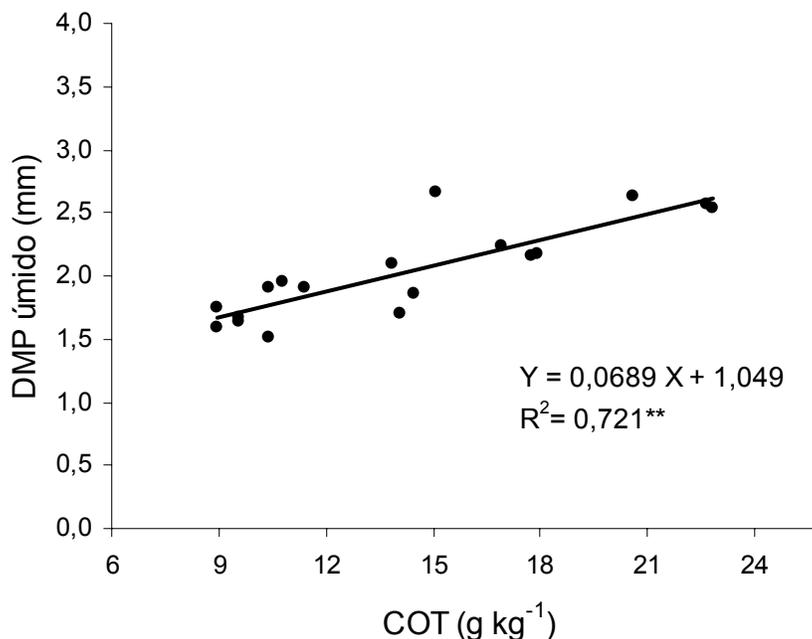


FIGURA 12. Relação entre o diâmetro médio ponderado obtido por peneiragem via úmida (DMPúmido) e o carbono orgânico total (COT).

camada de 5-10 cm, quando o solo passou de pastagem nativa para preparo convencional respectivamente. Os autores atribuíram a maior resistência dos agregados ao aumento da compactação do solo e ao aumento da argila dispersa, que tornaram os agregados mais densos e endurecidos. D'agostini (1992) enfatiza que agregados sujeitos a tensões compressivas tornam-se mais densos devido ao rearranjo de partículas, sendo mais resistentes às pressões externas devido ao aumento da sua coesividade.

A maior resistência dos agregados à ruptura nas áreas cultivadas no presente estudo explica o fato do DMPseco dos solos cultivados serem tão elevados quanto os do solo da mata, apesar do menor teor de matéria orgânica nestes solos, o que é indício que o grau de compactação teve maior influência no desenvolvimento da coesão e da resistência dos agregados, em relação à matéria orgânica do solo. A resistência dos agregados à ruptura juntamente com a densidade do solo e o teor de água exercem influência na capacidade do solo de suportar carga (Carpenedo, 1994).

4.2.7 Parâmetros de cisalhamento direto do solo

4.2.7.1 Coesão e ângulo de atrito interno do solo

Considerando que a coesão do solo é um fator pedogenético nas camadas subsuperficiais nos solos de tabuleiros, a determinação deste atributo foi realizada apenas nas camadas de 0,2-0,4m e 0,4-0,8m, e são apresentados na Tabela 14. Os solos estudados apresentam média geral para os valores de coesão do solo de 71,18 kPa e 122,64 kPa nas camadas de 0,2-0,4m e 0,4-0,8m respectivamente.

TABELA 14. Valores médios de coesão do solo (kPa) em função do sistema de manejo e umidade nas profundidades estudadas

Teor de água (kg kg ⁻¹)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
	camada 0,2-0,4 m			
0,08	81,3 Ca	148,7 Aa	133,5 ABa	107,0 BCa
0,11	47,1 Bb	74,2 Ab	81,2 Ab	58,1 ABb
0,14	27,2 Ab	40,2 Ac	33,2 Ac	30,1 Ac
	camada 0,4-0,8 m			
0,08	172,4 Ca	248,0 ABa	271,8 Aa	210,3 BCa
0,11	60,8 Bb	110,7 Ab	114,9 Ab	96,4 ABb
0,14	38,1 Ab	46,1 Ac	59,1 Ab	43,2 Ac

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de três repetições.

MN = mata nativa, CS = sequeiro, CI = irrigado, CV = vinhaça

Houve efeito significativo da umidade do solo e dos sistemas de manejo com a cana-de-açúcar nos valores de coesão do solo nas duas camadas estudadas (Tabela 14). Verifica-se que a coesão aumenta significativamente com a redução do teor de água nos quatro sistemas de manejo estudados, chegando a um valor cinco vezes maior quando o solo passa do teor de água no estado friável (0,14 kg kg⁻¹) para o estado seco (0,08 kg kg⁻¹) na camada de 0,4-0,8m (Tabela 14 e Apêndice 9), evidenciando a tendência desses solos em desenvolverem alta coesão entre as partículas quando secos.

O aumento da coesão do solo com a redução do teor de água do solo tem sido verificado por outros autores (Mckyes et al., 1994; Boeni, 2000; Machado,

2001). Arvidsson et al. (2001) encontraram valores de coesão de 87 kPa em solo de textura média com teor de água de $0,17 \text{ kg kg}^{-1}$, e verificaram um aumento da coesão para 154 kPa quando determinada com o solo a $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ de umidade. Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), como a diminuição do teor de água no solo reduz a distância entre as partículas, há uma conseqüente maior atração entre elas, resultando num aumento da coesão do solo. As equações de regressão que relacionam a coesão com teor de água nos solos estudados são apresentadas no Apêndice 10.

A coesão do solo foi influenciada significativamente pelos sistemas de manejo estudados, verificando-se maiores valores de coesão do solo nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo da mata nas duas camadas estudadas. Com o teor de água de $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$, que está na faixa de friabilidade, não houve diferença significativa entre os valores de coesão do solo entre os sistemas de manejo na camada de 0,2-0,4m, com os valores de coesão variando entre 27,2 a 40,2 kPa. Com o solo nos teores de água mais baixos (umidades $0,11$ e $0,08 \text{ kg kg}^{-1}$), há um aumento significativo da coesão nos solos cultivados em relação ao solo sob mata nativa, com o solo sob o sistema sequeiro apresentando a maior coesão (148,7 kPa). Na camada de 0,4-0,8m, os valores de coesão do solo tiveram a mesma tendência, com os solos cultivados sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentando os maiores valores de coesão nas umidades de $0,08$ e $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$.

O aumento da densidade do solo nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados em relação ao solo da mata provavelmente contribuiu para o aumento da coesão do solo. Rocha et al. (2002) verificaram maiores valores de coesão do solo em solos com maior densidade. De acordo com Lambe & Whitman (1979), quando o solo está com um maior grau de compactação, as partículas estão mais próximas uma das outras, favorecendo o desenvolvimento da coesão quando o solo está com baixos teores de água.

Além da densidade do solo, os aumentos dos teores de argila e óxidos nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados possivelmente contribuíram para o aumento da coesão nestes solos. Este efeito é enfatizado no solo com vinhaça, que apresentou uma maior coesão em relação ao solo da mata na camada de 0,4-0,8m, apesar dos valores semelhantes de densidade do solo nestes dois solos (Tabela 10).

A influência de atributos como densidade do solo, teor de argila, argila dispersa em água e agentes cimentantes (óxidos de Fe, Si e Al) no desenvolvimento da coesão do solo tem sido enfatizada na literatura (Mitchell, 1976; Chartres et al., 1990; Fredlund & Rahardjo, 1993).

No presente estudo, considerando os três teores de água, a coesão do solo correlacionou-se significativamente com os atributos densidade do solo ($r = 0,53^*$), teor de argila ($r = 0,43^{**}$), Fed ($r = 0,42^{**}$), Sid ($0,44^{**}$) e Ald ($r = 0,39^{**}$), sugerindo a influência destes atributos na coesão do solo.

Considerando que as três áreas cultivadas no presente estudo têm atividades com máquinas e implementos agrícolas, o aumento da coesão do solo nas camadas subsuperficiais pode ser resultado tanto do processo de compactação, como também pelo processo de adensamento, promovido pelos aumentos do teores de argila e óxidos nestas camadas, em relação ao solo da mata.

A Tabela 15 mostra os valores do ângulo de atrito interno do solo no teor de água de $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$. Verifica-se um aumento significativo do ângulo de atrito interno nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça em relação ao solo de mata nativa na camada de 0,2-0,4m, não havendo diferença entre as áreas cultivadas.

TABELA 15. Valores de ângulo de atrito interno do solo em função dos sistemas de manejo e profundidades, no teor de água de $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$.

Camada (m)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
	Ângulo de atrito interno ($^{\circ}$)			
0,2-0,4	29,18 Ba	39,32 Aa	40,15 Aa	37,62 Aa
0,4-0,8	24,75 Ab	27,29 Ab	28,02 Ab	27,07 Ab

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de três repetições.

MN = mata nativa, CS = sequeiro, CI = irrigado, CV = vinhaça

Os maiores valores do ângulo de atrito interno do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar refletem os maiores valores de densidade do solo, como verificado pela correlação entre estes atributos na Figura 13. A maior densidade dos solos cultivados resulta num maior número de pontos de contato entre as partículas do solo e conseqüente aumento do atrito entre elas (Ashburner & Sims, 1984).

Este aumento nos valores do ângulo de atrito interno nos solos cultivados também reflete as mudanças ocorridas na estrutura do solo provocadas pelo cultivo nas áreas com cana-de-açúcar. A camada de 0,2-0,4m dos solos cultivados apresenta estrutura predominantemente em blocos angulares e subangulares, enquanto no solo da mata a estrutura predominante é granular, com os agregados mais arredondados. Rocha et al. (2002) trabalhando com várias classes de solos, verificaram que solos com estrutura em blocos apresentaram maior ângulo de atrito interno e maiores valores de resistência do solo ao cisalhamento direto. De acordo com Lebert & Horn (1991), a estrutura em blocos promove uma maior entrosamento entre as unidades estruturais, resultando num aumento do número de contatos entre si, e conseqüente aumento do ângulo de atrito interno do solo.

Na camada 0,4-0,8 m, apesar do maior grau de compactação nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, não houve diferença significativa entre os valores do ângulo de atrito interno do solo, provavelmente devido a pouca diferença entre as estruturas nas quatro áreas estudadas.

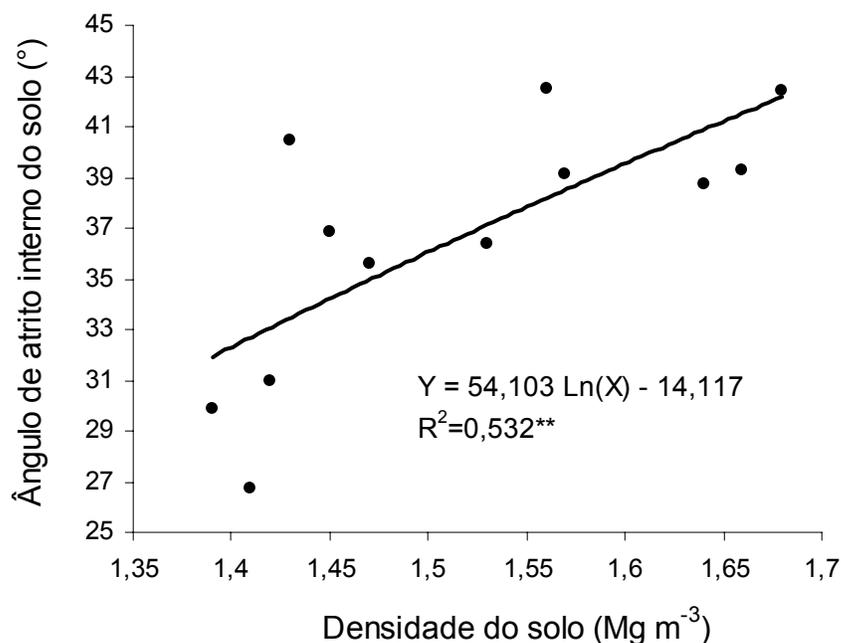


FIGURA 13. Ângulo de atrito interno do solo em função da densidade do solo

Verifica-se uma redução significativa no ângulo de atrito interno do solo em profundidade em todos os sistemas de manejo estudados, provavelmente devido ao maior teor de argila na camada de 0,4-0,8m. Segundo Al-Shayea (2001), o ângulo

de atrito interno do solo diminui com o aumento do teor de argila do solo, pois as partículas de argila revestem a superfície das partículas de areia, diminuindo a fricção entre estas.

4.2.8 Parâmetros de compressibilidade do solo

4.2.8.1. Pressão de precompactação do solo

Houve efeito significativo dos sistemas de manejo e umidade sobre a pressão de precompactação do solo nas duas camadas estudadas (Tabela 16 e Apêndice 11). As médias gerais foram de 98,89 kPa e 109,69 kPa para as camadas 0-0,2m e 0,2-0,4m respectivamente. A influência da umidade foi significativa nos quatro sistemas de manejo e nas duas camadas estudadas, com os valores de pressão de precompactação diminuindo com o aumento da umidade do solo, verificando-se desta forma a maior resistência do solo às pressões externas na medida em que diminui o teor de água do solo. As equações de regressão que relacionam a pressão de precompactação e a umidade do solo encontram-se no Apêndice 13.

A redução da pressão de precompactação com o aumento da umidade do solo também tem sido verificada por outros autores (Carpenedo, 1994; Kondo & Dias Junior, 1999a; Boeni, 2000). Segundo Hillel (1980) o solo com baixo teor de água torna-se mais resistente devido à dureza de sua matriz, que exibe uma alta resistência friccional às deformações impostas por pressões externas aplicadas ao solo. Quando a umidade do solo aumenta, filmes de água não só enfraquecem as ligações interpartículas como também reduzem a fricção entre elas, agindo como lubrificante e favorecendo o rearranjo.

Para os teores de água mais baixos (0,08 e 0,11 kg kg⁻¹), os solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça apresentam uma maior pressão de precompactação em relação ao solo sob mata nativa nas duas camadas estudadas. Isto reflete a história de tensões dos solos cultivados, em que cargas aplicadas pelas máquinas agrícolas nas operações de cultivo promoveram um maior grau de compactação nestes solos, conferindo uma maior resistência à compressão. Este efeito é comprovado pela correlação positiva entre a pressão de precompactação e a densidade do solo (Figura 14). O efeito da densidade do solo na pressão de precompactação também foi verificado por Silva et al. (2002b), que constataram um aumento significativo da pressão de precompactação de 68 kPa para 164 kPa,

quando o solo estava com densidades de 1,3 e 1,6 respectivamente, em um Argissolo Vermelho Amarelo.

TABELA 16. Valores médios de pressão de precompactação (kPa) em função do sistema de manejo e teor de água nas profundidades estudadas.

Teor de água (kg kg ⁻¹)	Sistema de manejo			
	MN	CS	CI	CV
camada 0-0,2m				
0,08	119,0 Ca	150,2 Aa	144,3 ABa	130,8 BCa
0,11	113,0 Ba	137,3 Aa	132,0 ABa	115,3 Ba
0,14	104,3 Aa	86,5 Ab	89,3 Ab	91,0 Ab
0,19	72,5 Ab	24,2 Cc	26,3 Cc	45,5 Bc
camada 0,2-0,4m				
0,08	132,5 Ba	160,5 ABa	172,0 Aa	147,8 ABa
0,11	116,3 Ba	143,3 ABa	149,8 Ab	121,0 ABab
0,14	106,5 Ab	105,3 Ab	107,5 Ac	94,8 Ab
0,19	62,5 Ab	33,5 Bc	35,8 Bd	66,8 Ac

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições
MN = mata nativa, CS = sequeiro, CI = irrigado, CV = vinhaça

Apesar da maior estabilidade dos agregados do solo sob mata nativa, o maior espaço poroso deste solo proporcionou maior deformação do solo e conseqüente menor capacidade de suporte de carga. Nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar, o empacotamento mais denso das partículas e conseqüente maior número de pontos de contatos entre elas proporcionou uma maior capacidade de suporte de carga nestes solos.

Os solos sob os sistemas de sequeiro, irrigado e com vinhaça apresentaram baixa capacidade de suporte de carga quando o solo está com teor de água de 0,19 kg kg⁻¹, provavelmente pelo fato deste teor de água estar acima do limite de plasticidade desses solos, o que promoveu a deformação plástica por ocasião do teste de compressão uniaxial.

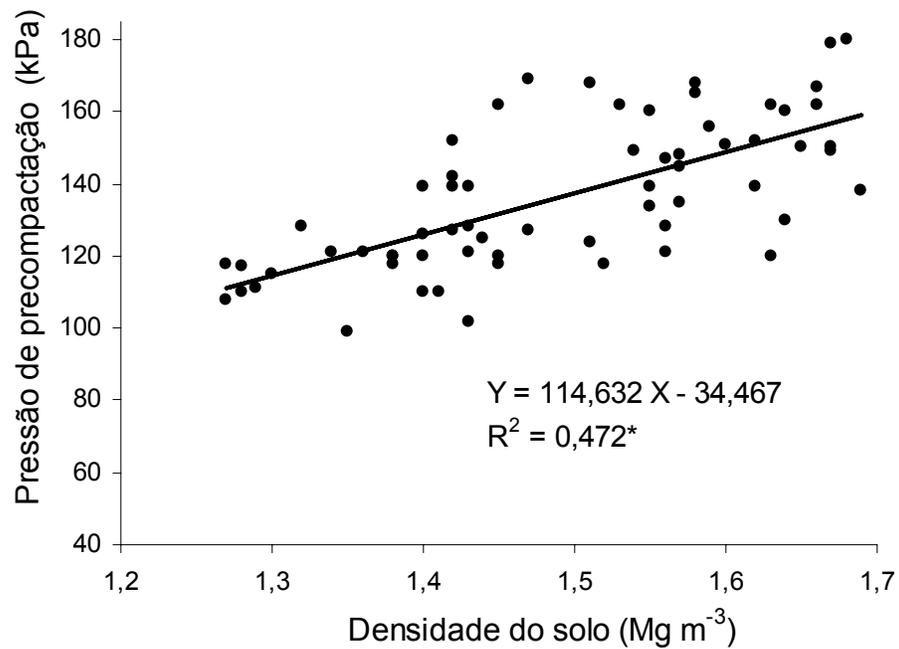


FIGURA 14. Relação entre pressão de precompactação e densidade do solo.

A importância da determinação da pressão de precompactação associada ao teor de água é enfatizada na Figura 15. Analisando as micrografias de amostras do solo da mata obtidas com microscópio eletrônico de varredura após o teste de compressão uniaxial, verifica-se que, quando o solo está com um teor de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$, após aplicação de pressão vertical (σ_n) de 50 kPa, o solo apresenta uma estrutura aberta, com porosidade preservada entre os agregados e entre as partículas de silte e argila (Figura 15a). A pressão vertical de 50 kPa aplicada é menor que a pressão de precompactação deste solo no teor de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$ (72,5 kPa), o que fez com que o solo preservasse a sua estrutura, pois a pressão aplicada é menor que as pressões já experimentadas neste solo na sua história de tensões.

Com aplicação de uma pressão compressiva de 100 kPa, no solo com teor de água de $0,19 \text{ kg kg}^{-1}$, nota-se uma nítida alteração na organização da matriz do solo, com uma drástica redução da porosidade, ficando o solo com aspecto maciço (Figura 15b). Observa-se na matriz do solo um aspecto de orientação de suas partículas, devido à deformação plástica ocorrida pela compressão do solo.

Com o teor de água mais baixo ($0,14 \text{ kg kg}^{-1}$), o solo suporta uma pressão vertical de 100 kPa mantendo a organização da matriz com uma estrutura aberta,

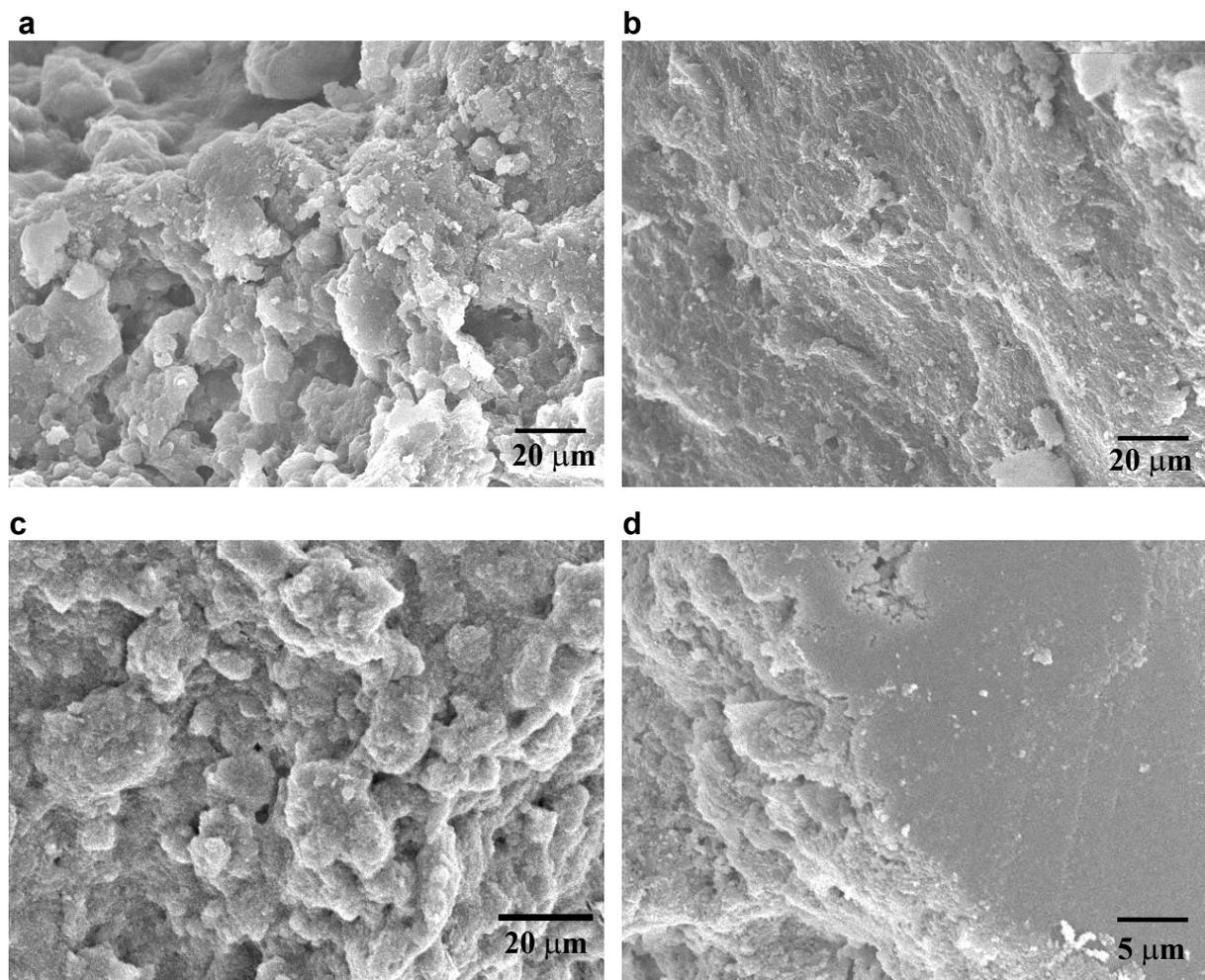


FIGURA 15. Micrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) em amostras do solo sob mata nativa (camada 0-0,2m), após teste de compressão uniaxial. a) $\sigma_n = 50$ kPa; $U_g = 0,19$ kg kg⁻¹ b) $\sigma_n = 100$ kPa; $U_g = 0,19$ kg kg⁻¹ c) $\sigma_n = 100$ kPa; $U_g = 0,14$ kg kg⁻¹ d) $\sigma_n = 200$ kPa; $U_g = 0,14$ kg kg⁻¹.

formada por agregados distintos, com uma rede de poros entre eles (Figura 15c), pois esta pressão aplicada está abaixo da pressão de precompactação deste solo (104 kPa). Com aplicação de uma pressão vertical de 200 kPa, no entanto, verifica-se a degradação da estrutura do solo (Figura 15d), que fica com aspecto maciço, com orientação das partículas de argila, devido a pressão compressiva aplicada está acima da pressão de precompactação do solo, no teor de água de 0,14 kg kg⁻¹. A determinação do teor de água adequado para a realização das atividades agrícolas, associada a determinação da pressão máxima que o solo pode suportar torna-se importante para se evitar a compactação dos solos cultivados.

De acordo com Lebert & Horn (1991), a pressão de precompactação do solo é dependente não só de fatores como densidade e umidade do solo, mas também é fortemente influenciada por fatores como coesão e ângulo de atrito interno do solo.

No presente estudo, além da umidade e densidade do solo, a coesão do solo, ângulo de atrito interno e resistência dos agregados à ruptura possivelmente influenciaram a capacidade de suporte de carga dos solos estudados. A pressão de precompactação correlacionou-se significativamente com a coesão do solo ($r=0,78^{**}$), ângulo de atrito interno do solo ($r=0,83^{**}$) e resistência dos agregados à ruptura ($r=0,56^*$), sugerindo a contribuição destes atributos para uma maior capacidade de suporte de carga, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado. Carpenedo (1994) e Silva et al. (2000) também verificaram a influência significativa de alguns atributos na pressão de precompactação do solo, entre eles a coesão, resistência dos agregados à ruptura, umidade e densidade do solo.

A capacidade de suporte de carga do solo pode ser elevada devido a duas situações extremas; a primeira, quando o solo está com um grau de compactação elevado, refletindo numa maior resistência do solo à compressão, porém, esta condição não é favorável ao desenvolvimento das plantas. Uma segunda situação em que o solo pode apresentar uma alta pressão de precompactação ocorre quando ele está com uma boa estabilidade estrutural, que ocorre em solos submetidos a sistemas de manejo com ausência de revolvimento do solo, como é comprovado por alguns autores (Carpenedo, 1994; Silva et al., 2002a), que verificaram maiores pressões de precompactação em solos cultivados sob sistema plantio direto em relação a solos sob preparo convencional.

Entre os quatro sistemas de manejo estudados, considerando a pressão de precompactação e os atributos porosidade, densidade do solo e estabilidade de agregados, verifica-se que os solos sob os sistemas mata nativa e com vinhaça apresentam uma capacidade de suporte de carga associada as melhores condições para o desenvolvimento das plantas, indicando que a sua resistência representada pela pressão de precompactação está vinculada a uma melhor estabilidade estrutural, enquanto os solos sob os sistemas sequeiro e irrigado têm a capacidade de suporte de carga associada a um aumento do grau de compactação do solo.

A preocupação de se trabalhar o solo com teores de água que estejam dentro da faixa de friabilidade é um fator essencial, mas não suficiente para impedir a compactação do solo. As pressões externas impostas ao solo pelas máquinas

agrícolas e animais nas atividades de cultivo podem provocar a compactação do solo, mesmo se trabalhado com teores de água dentro da faixa de friabilidade, caso sejam aplicadas pressões superiores a pressão de precompactação do solo.

4.2.8.2. Índice de compressão do solo

Houve efeito significativo dos sistemas de manejo e umidade sobre o índice de compressão do solo nas duas camadas estudadas (Tabela 17 e Apêndice 12). Sendo o índice de compressão a inclinação da reta de compressão virgem (Figura 1), ele é usado como um indicador da compressibilidade do solo, sendo um solo mais compressível quanto maior o seu índice de compressão.

TABELA 17. Valores médios de índice de compressão do solo em função do sistema de manejo e teor de água nas profundidades estudadas.

Teor de água (kg kg ⁻¹)	Sistema de Manejo			
	MN	CS	CI	CV
camada 0-0,2m				
0,08	0,23 Ab	0,13 Bb	0,14 Bb	0,21 Ab
0,11	0,28 Aa	0,14 Cb	0,15 Cb	0,25 Ba
0,14	0,31 Aa	0,21 Ba	0,19 Ba	0,28 Aa
0,19	0,29 Aa	0,18 Ba	0,19 Ba	0,28 Aa
camada 0,2-0,4m				
0,08	0,22 Ab	0,16 Bb	0,15 Bb	0,21 Ab
0,11	0,29 Aa	0,18 Bb	0,15 Bb	0,27 Aa
0,14	0,30 Aa	0,27 Ba	0,26 Ba	0,28 ABa
0,19	0,30 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa	0,30 Aa

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de quatro repetições
MN = mata nativa, CS = sequeiro, CI = irrigado, CV = vinhaça

Os maiores valores do índice de compressão do solo ocorreram nos teores de água mais elevados em todos os sistemas de manejo nas duas camadas estudadas, o que demonstra a menor resistência do solo à compressão à medida que aumenta o teor de água do solo. Este fenômeno ocorre pelo fato da água agir como lubrificante, favorecendo o deslocamento e rearranjo das partículas, resultando numa maior compressibilidade do solo (Al-Shayea, 2001). Silva et al.

(2002a) também verificaram maiores valores de índice de compressão em um Argissolo Vermelho Amarelo nos teores de água mais elevados. Segundo os autores, o atrito entre as partículas quando o solo está mais seco é suficientemente grande para limitar o seu deslocamento e rearranjo, sendo necessária mais água para facilitar o deslocamento das partículas do solo.

Os solos sob mata nativa e com vinhaça apresentaram os maiores valores de índice de compressão nas duas camadas estudadas devido a maior porosidade nestes dois solos. O maior espaço poroso do solo, principalmente a macroporosidade, possibilitou um maior rearranjo das partículas do solo com a aplicação das pressões externas pelo teste de compressão uniaxial.

Nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, a maior compactação destes solos proporcionou um menor índice de compressão, ou seja, uma menor compressibilidade do solo, como consequência de um maior número de pontos de contatos entre as partículas e maior atrito entre elas. A influência da densidade do solo na sua compressibilidade é mostrada na Figura 16, onde verifica-se que o índice de compressão tem correlação negativa e significativa com a densidade do solo, mostrando que o maior estado de compactação e o arranjo mais compacto das partículas do solo torna-o menos susceptível à compressão. Carpenedo (1994) também verificaram correlação negativa entre o índice de

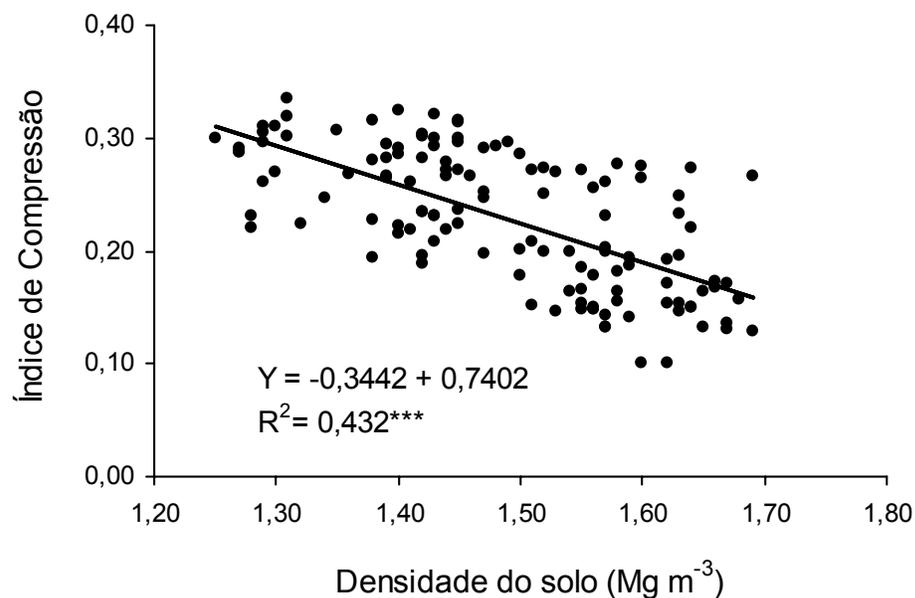


FIGURA 16. Relação entre índice de compressão e densidade do solo.

compressão e a densidade do solo em um Podzólico Vermelho Escuro. O autor também verificou menor compressibilidade do solo com maiores valores do ângulo de atrito interno e resistência do solo ao cisalhamento.

4.3. Matéria seca de raízes

Houve efeito significativo dos sistemas de manejo nos valores de matéria seca de raízes da cana-de-açúcar, com o solo sob o sistema com vinhaça apresentando os maiores valores nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m, em relação aos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado (Tabela 18). Considerando que as condições de preparo do solo e de tráfego de máquinas agrícolas são as mesmas nas três áreas cultivadas no presente estudo, o maior desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar no solo com vinhaça provavelmente reflete a melhor condição química deste solo, promovida pela aplicação da vinhaça, em relação aos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado. A matéria seca de raízes correlacionou-se positivamente com os atributos químicos Ca^{2+} ($r= 0,95^*$), Mg^{2+} ($r= 0,88^{**}$), K^+ ($r= 0,61^*$) e carbono orgânico total ($r= 0,87^{**}$).

TABELA 18. Matéria seca de raízes de cana-de-açúcar em função dos sistemas sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV) nas profundidades estudadas.

camada (m)	Sistema de manejo		
	CS	CI	CV
		(Mg ha ⁻¹)	
0-0,2	3,21 Ca	4,08 Ba	4,91 Aa
0,2-0,4	0,21 Bb	0,11 Bb	0,98 Ab
0,4-0,8	0,06 Ab	0,04 Ab	0,08 Ac

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas iguais na mesma coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (5%). Média de três repetições.

Os baixos valores de matéria seca de raízes na camada de 0,4-0,8m estão de acordo com os encontrados na literatura (Lima Júnior, 1982; Cerri et al., 1991). Cerri et al. (1991) encontraram 99 % da matéria seca de raízes de cana-de-açúcar nos primeiros 40 cm de profundidade em um Latossolo de textura argilosa. Paranhos (1987), no entanto, enfatiza que a profundidade do sistema radicular da

cana-de-açúcar pode atingir profundidades maiores, dependendo das condições físicas e químicas do solo.

No presente estudo, em média, 98% da matéria seca de raízes da cana-de-açúcar estão nos primeiros 0,4m de profundidade. Os maiores valores de alumínio trocável na camada de 0,4-0,8m (Tabela 4) possivelmente colaboraram para o menor crescimento do sistema radicular nesta camada. A matéria seca de raízes correlacionou-se negativamente com o teor de Al^{3+} ($r = -0,61^*$).

No presente estudo, os altos valores de coesão nas camadas subsuperficiais dos solos de tabuleiros também podem restringir o crescimento radicular da cana-de-açúcar. De acordo com Souza (1996), a presença de horizontes coesos em subsuperfície nos solos de tabuleiros costeiros restringe o desenvolvimento do sistema radicular de diversas culturas, causando prejuízos na produtividade.

4.4 Propriedades micromorfológicas do solo

Os diferentes sistemas de manejo promoveram modificações nas propriedades micromorfológicas do solo no que diz respeito à microestrutura, tipo de porosidade e organização das partículas da matriz do solo.

A Figura 17 mostra as micrografias das lâminas delgadas obtidas com microscópio óptico na camada de 0-0,2m dos tratamentos estudados. No solo sob mata nativa (Figura 17a), observa-se uma estrutura mais aberta, com presença de poros largos entre agregados e maior frouxidão no empacotamento dos grãos de areia e agregados na matriz do solo, havendo predomínio de poros do tipo empacotamento, onde os poros ocorrem entre os grãos de quartzo e agregados do solo (Brewer, 1976). Segundo Bullock et al. (1985), esses poros são muito interconectados e refletem em propriedades como condutividade hidráulica saturada, que apresentou valores maiores no solo da mata nativa, como verificado na Figura 11.

Nos solos cultivados sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça (Figuras 17b, 17c e 17d respectivamente), observa-se uma visível redução da porosidade, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, confirmando os menores valores de macroporosidade nestes solos, como verificado na Tabela 11. Nota-se um maior entrosamento das partículas, com as unidades menores preenchendo os espaços entre as partículas maiores, observando-se nitidamente um maior número de pontos de contatos entre as partículas nos solos cultivados em relação ao solo da mata.

O rearranjo das partículas na matriz do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar resultou na maior compactação do solo, como resultado das pressões externas exercidas nas atividades de cultivo. Esse empacotamento mais denso das partículas provavelmente contribuiu para uma maior capacidade de suporte de carga dos solos cultivados (maior pressão de precompactação), pois o maior ajustamento das partículas e o maior número de pontos de contatos entre elas exercem na matriz do solo uma função esquelética (Fitzpatrick, 1984), proporcionando uma maior resistência às pressões externas.

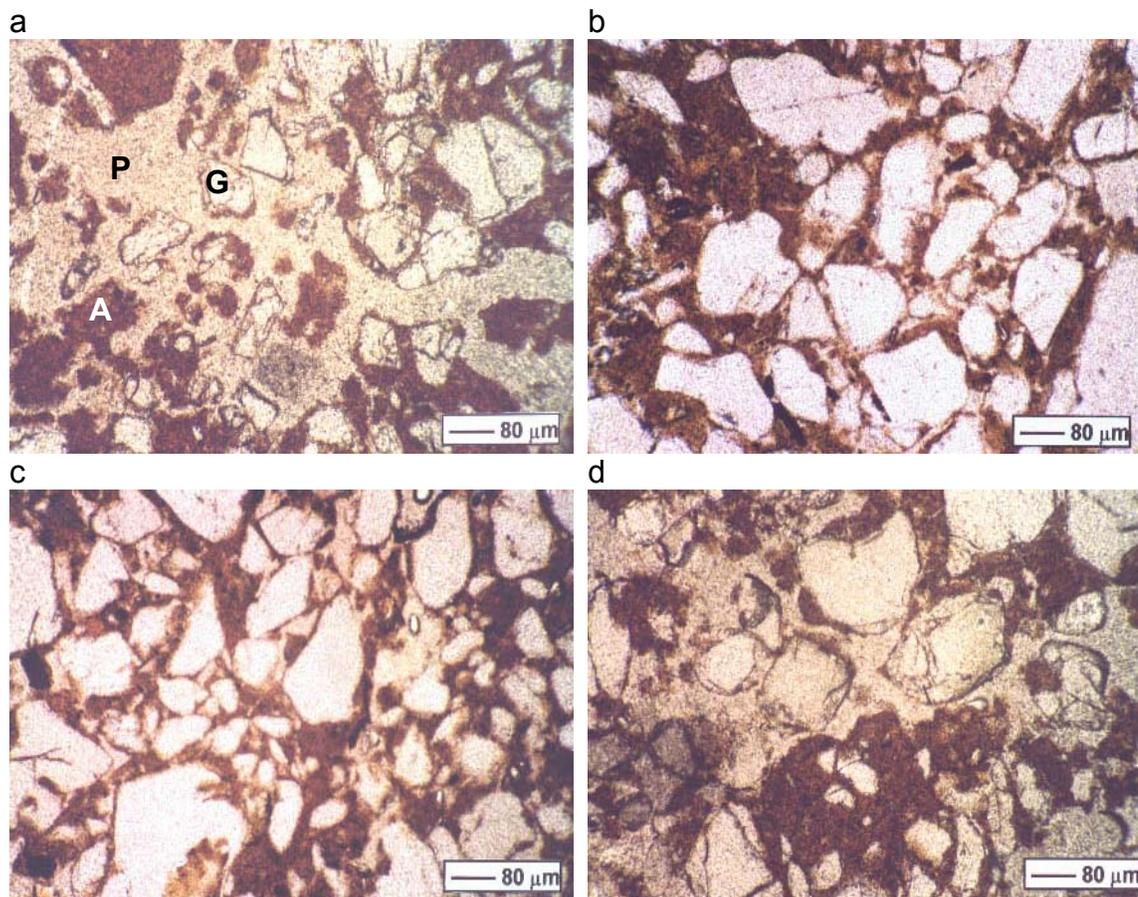


FIGURA 17. Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando a organização matricial da camada de 0-0,2m dos solos estudados.

a) solo sob mata nativa, estrutura aberta com porosidade elevada entre agregados e grãos de areia. b) solo sob cultivo sequeiro, redução do espaço poroso e empacotamento mais denso de partículas do solo. c) solo irrigado, maior número de pontos de contato entre partículas. d) solo com vinhaça, estrutura com aspecto menos compactado. Legenda: P = poro; G = grão de areia; A = agregado.

A Figura 18 mostra as micrografias das lâminas delgadas na camada de 0,2-0,4m dos solos nos tratamentos estudados. O solo sob mata nativa apresenta uma estrutura granular, com agregados arredondados exibindo uma forte pedalidade (Bullock et al., 1985), ou seja, rodeados por macroporos interconectados (Figura 18a). Este tipo de estrutura é resultado de sistemas com grande atividade biológica, e ao maior teor de matéria orgânica do solo (Brewer, 1976), o que é favorável à aeração e drenagem da água. Nos solos cultivados com cana-de-açúcar (Figuras 18b, 18c e 18d respectivamente), observa-se uma nítida redução da porosidade em relação ao solo da mata, bem como uma

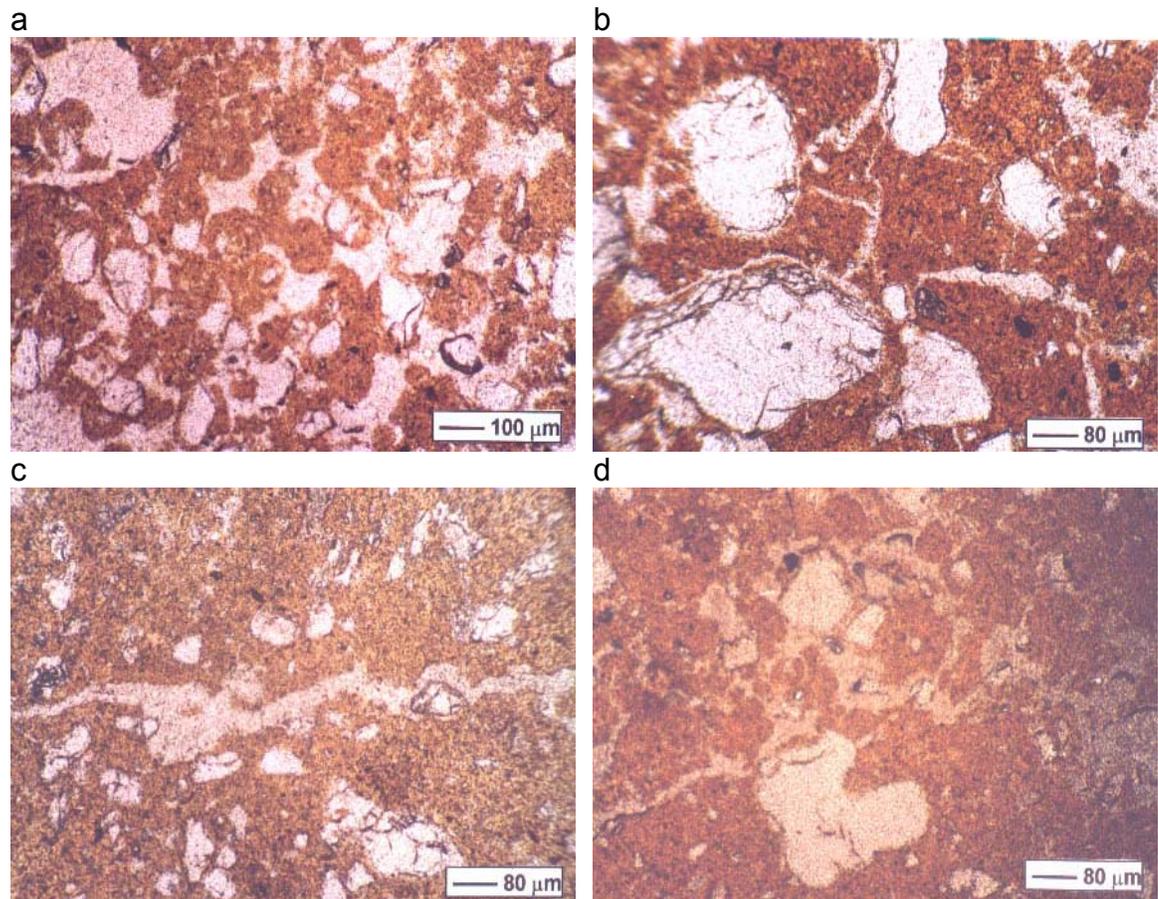


FIGURA 18. Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando a organização matricial da camada de 0,2-0,4m dos solos estudados. a) solo da mata, estrutura granular com poros de empacotamento interconectados. b) solo sob sequeiro, estrutura em blocos angulares, poros fissurados. c) solo irrigado, estrutura maciça com poro alongado paralelo à superfície do solo. d) solo com vinhaça, estrutura em bloco subangulares e maciça.

mudança na forma dos poros, com predominância de poros aplanados (Bullock et al., 1985). A mudança na estrutura é evidente nestes solos, observando-se um predomínio de estrutura em blocos subangulares e angulares (Figuras 18b e 18d), o que permite um maior ajustamento entre as faces dos agregados (Bullock et al., 1985). Segundo Lebert & Horn (1991), a estrutura em blocos permite um maior entrosamento entre as unidades estruturais, resultando em maior coesão e atrito entre elas, o que foi verificado no presente estudo.

Nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar, constatou-se também a presença de poros alongados, paralelos à superfície do solo, como verificado na Figura 18c. Este tipo de porosidade geralmente é resultado de processos de compressão do solo por máquinas agrícolas nas atividades de cultivo (Marsili et al., 1998; VandenBygaart et al., 1999).

Na camada de 0,4-0,8m, a organização matricial foi semelhante nas quatro áreas estudadas (Figura 19), onde os grãos de quartzo encontram-se totalmente embebidos num fundo matricial constituído pelas frações mais finas. Verifica-se, em geral, poucos macroporos visíveis, e predominância de microporos, dando a

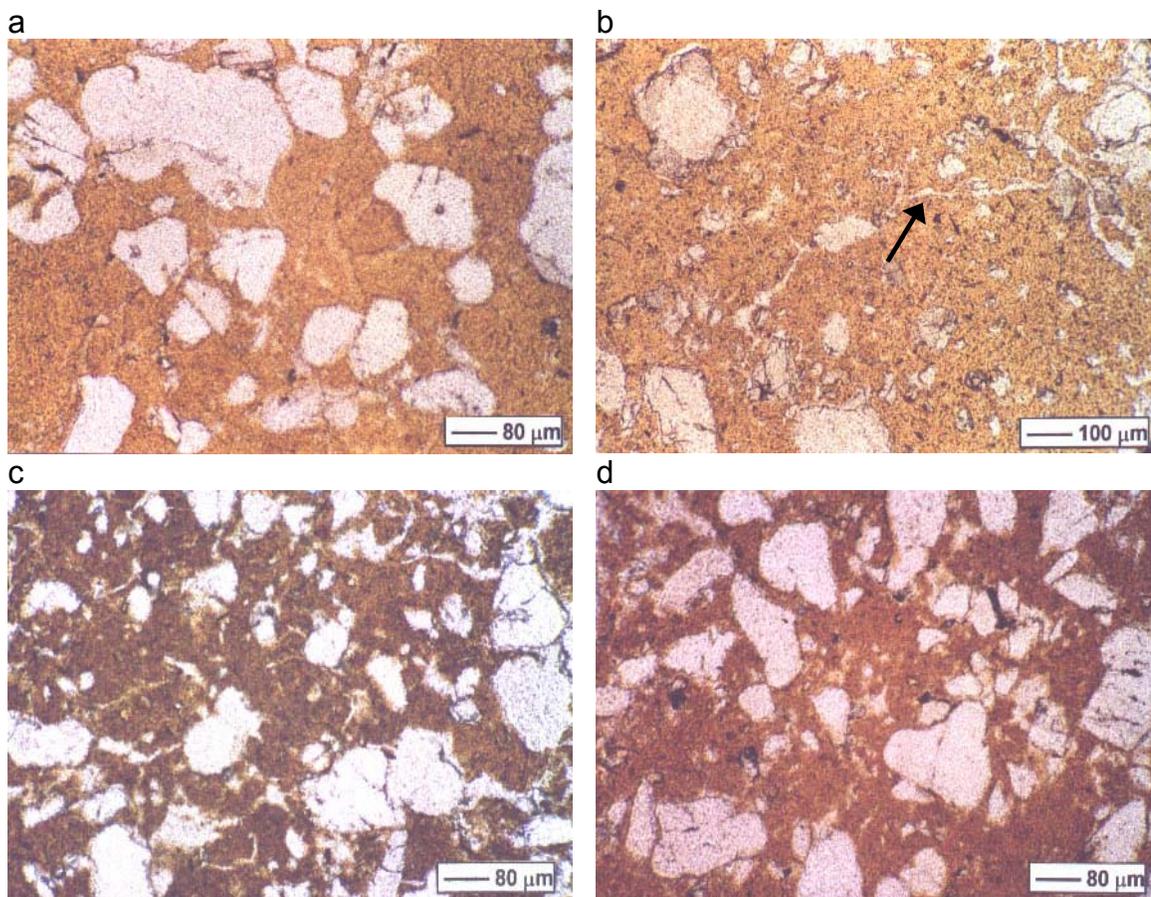


FIGURA 19. Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando a organização matricial da camada de 0,4-0,8m dos solos estudados. a) solo da mata, estrutura com aspecto maciço. b) solo sob sequeiro, estrutura com aspecto maciço com poros tipo fissuras (seta). c) solo irrigado, estrutura com aspecto maciço com fissuras. d) solo com vinhaça, estrutura com aspecto maciço.

matriz do solo um aspecto maciço. Nas lâminas delgadas dos solos cultivados, no entanto, verificou-se a presença de poros tipo fissuras (Figuras 19b e 19c), com aspecto descontínuo, o que geralmente reduz a drenagem da água no perfil do solo (Brewer, 1976). A presença deste tipo de poros na camada de 0,4-0,8m das áreas cultivadas indica que os efeitos da compressão do solo nas atividades de cultivo atingiram esta camada (Marsili et al., 1998; Silva et al., 1998), o que possivelmente contribuiu para o aumento da densidade e coesão nestes solos.

Além das mudanças na organização matricial, no que diz respeito ao arranjo das partículas e geometria dos poros, verificaram-se alterações na qualidade dos agregados devido ao cultivo. A Figura 20a mostra a boa estrutura

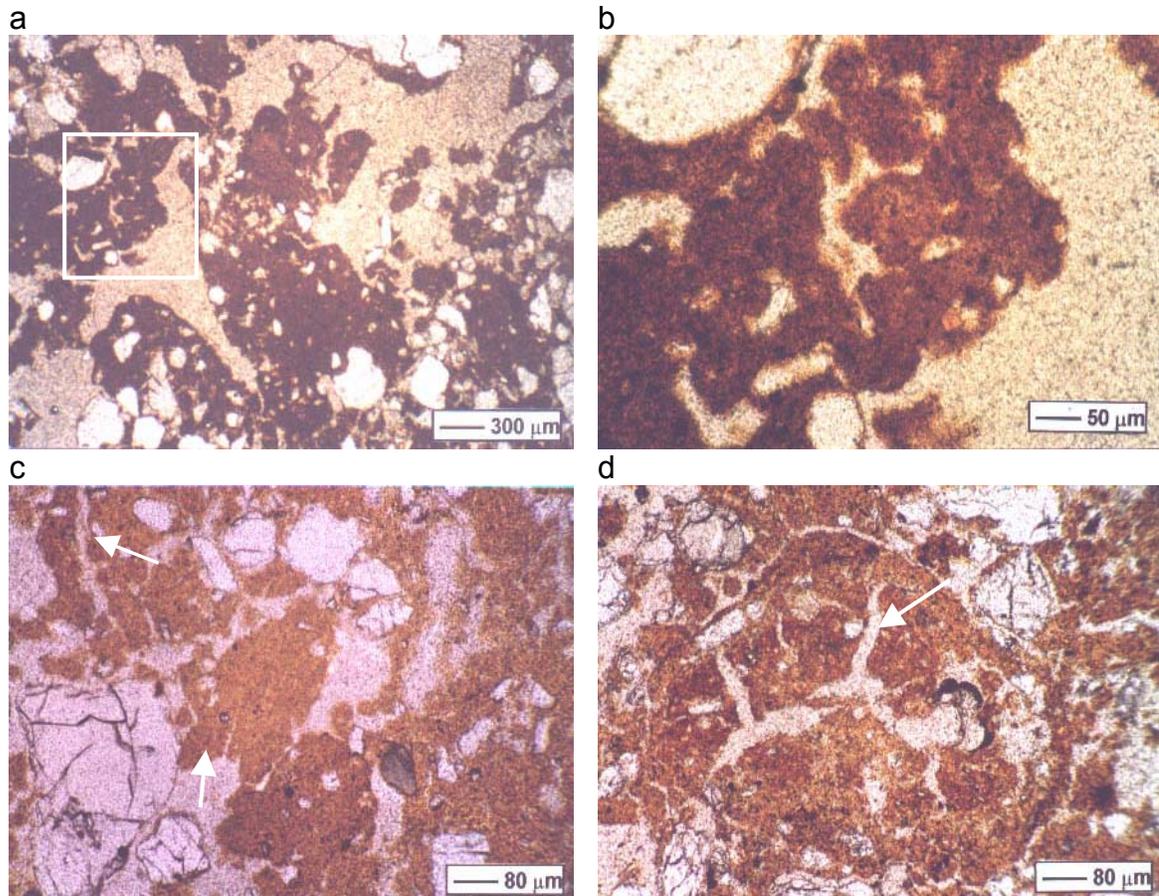


FIGURA 20. Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando aspecto de agregados dos solos estudados. a) solo da mata (0-0,2m) com macroagregados rodeados por poros largos, b) ampliação da foto “a”, macroagregados formados por união de microagregados e porosidade intraagregado, c) solo sob sequeiro (0-0,2m), agregados com forma arestada com predomínio de microporos. Verifica-se também agregados com indícios de fratura (seta). d) solo irrigado (0-0,2m), macroagregado com diversas fissuras (seta), fragmentando-se em agregados menores e com reduzida porosidade inter-agregados.

do solo da mata, onde os macroagregados ($\phi > 250 \mu\text{m}$) são rodeados por poros largos, evidenciando a maior macroporosidade neste solo, que facilita a aeração e infiltração da água no solo. Esses agregados são formados por agregados de menor tamanho (ϕ entre 20-100 μm), com um sistema de poros interligados entre si (Figura 20b). Segundo Tisdall & Oades (1982), os macroagregados resultam da associação de microagregados unidos por diversos agentes ligantes. Esses

macroagregados quando formados em solos sob mata tem macroporos suficientes para promover a aeração, bem como microporos para retenção de água para as plantas, enquanto os poros inter-agregados são largos para facilitar a infiltração da água.

Na Figura 20c, a matriz do solo mostra macroagregados com poucos poros visíveis e com formas mais arestadas, resultando em agregados com aspecto maciço, com predominância de microporos, o que geralmente reflete a ação de forças compressivas em solos cultivados (Dexter, 1988; Drees et al., 1994). Carpenedo & Mielniczuk (1990) também verificaram agregados com forma mais arestadas e com aspecto adensado em solos cultivados, enfatizando que tais agregados são formados devido à compactação do solo.

Nas lâminas delgadas dos solos cultivados, observou-se também macroagregados com porosidade formada por fissuras, com aspecto de fratura, dividindo-se em agregados menores com formas mais angulares e pontiagudos (Figura 20d). De acordo com Drees et al. (1994), este tipo de porosidade dentro dos agregados geralmente reflete o início do fracionamento de um macroagregado em agregados menores devido às operações de cultivo do solo. Em solos cultivados, o processo de degradação física manifesta-se pela perda da qualidade da estrutura, podendo ocasionar crostas superficiais e camadas compactadas (Cabeda, 1984).

Nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, apesar do preparo do solo ser realizado a cada 5-6 anos, o intenso tráfego de máquinas anualmente nas operações de colheita, provavelmente, contribui para a compressão da matriz do solo e fragmentação dos agregados, contribuindo para sua ruptura em agregados menores.

Observações feitas com o microscópio eletrônico de varredura mostram o arranjo de partículas primárias em agregados dos solos (Figura 21), percebendo-se que o aspecto da porosidade dos agregados é um reflexo do arranjo de partículas finas na matriz do solo. Os agregados do solo sob mata nativa mostram uma estrutura muito porosa com partículas de argila formando agregados tamanho silte, separados por superfície de fraqueza (Figura 21a). As partículas primárias são ligadas entre si devido a ação de agentes ligantes diversos (Figura 21b), formando microagregados de diversos tamanhos na matriz do solo, que por sua vez dão origem aos macroagregados (Tisdall & Oades, 1982).

Nos agregados das áreas cultivadas, verificam-se partículas tamanhos silte e argila com aspecto de orientação (Figuras 21c e 21d), ficando os agregados com aspecto maciço, com porosidade formada por diversas fissuras na superfície (Figura 21c), o que reflete o estado mais adensado dos agregados. Esse

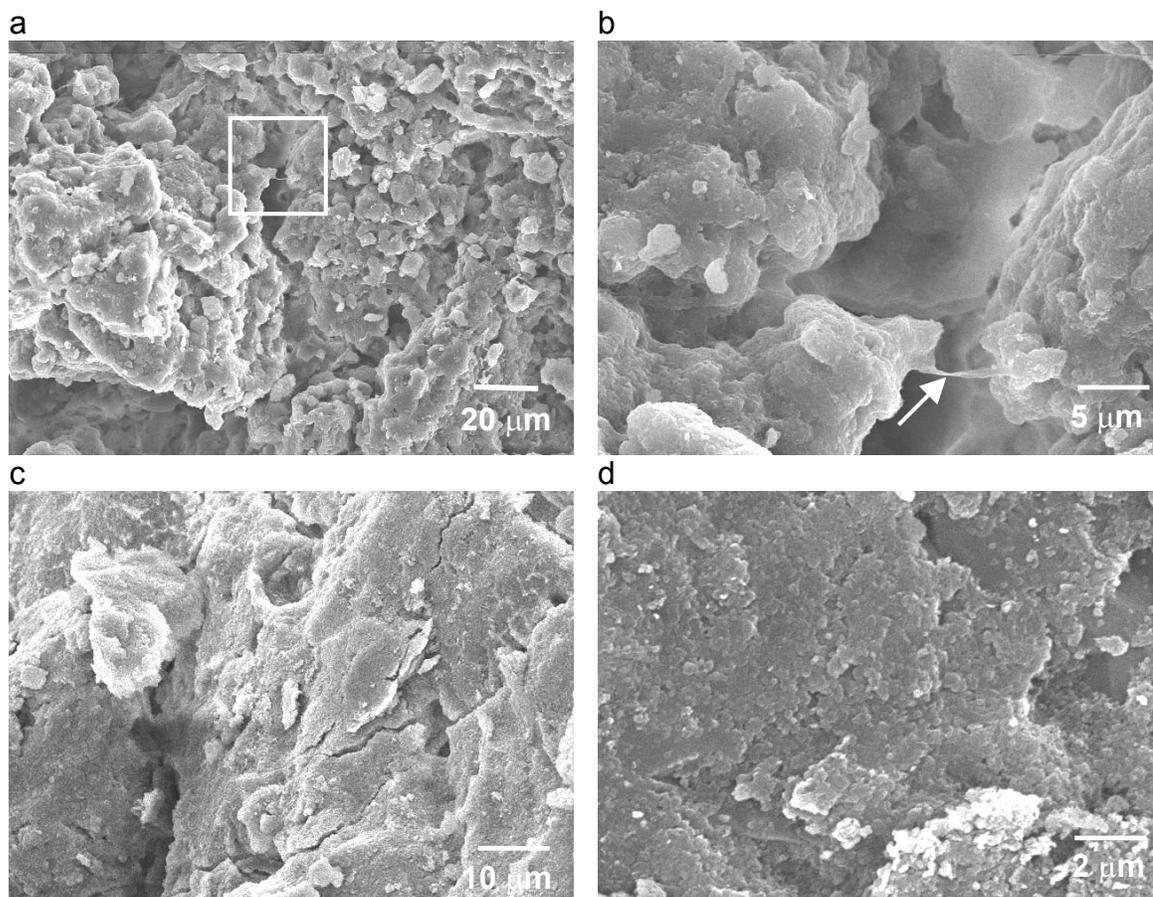


FIGURA 21. Micrografias obtidas com microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrando agregados dos solos estudados. a) solo da mata (0-0,2m), arranjo de partículas em agregados mostrando estrutura porosa; b) solo da mata (0-0,2m), ampliação da foto “a” mostrando agentes ligantes unindo partículas tamanhos silte e argila (seta). c) solo sob sequeiro (0-0,2m), agregado com orientação de partículas e superfície com aspecto adensado. d) solo com vinhaça (0-0,2m), agregado com orientação de partículas de argila.

rearranjo de partículas nos agregados provavelmente é resultado de compressão do solo nas atividades de cultivo. Segundo D’Agostini (1992), sob pressão compressiva, ocorre orientação das partículas nos agregados, tornando-os mais densos e coesos, e como consequência, mais resistentes à compressão. Este fenômeno também foi enfatizado por Utomo & Dexter (1981). No presente estudo, possivelmente os maiores valores de resistência dos agregados à ruptura

nos solos cultivados (Tabela 13) estejam relacionados ao maior adensamento dos agregados nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar .

Na camada superficial do solo sob mata nativa, a presença de porosidade específica (Figura 22a), ou seja, de bioporos (penetrações de raízes, atividades da

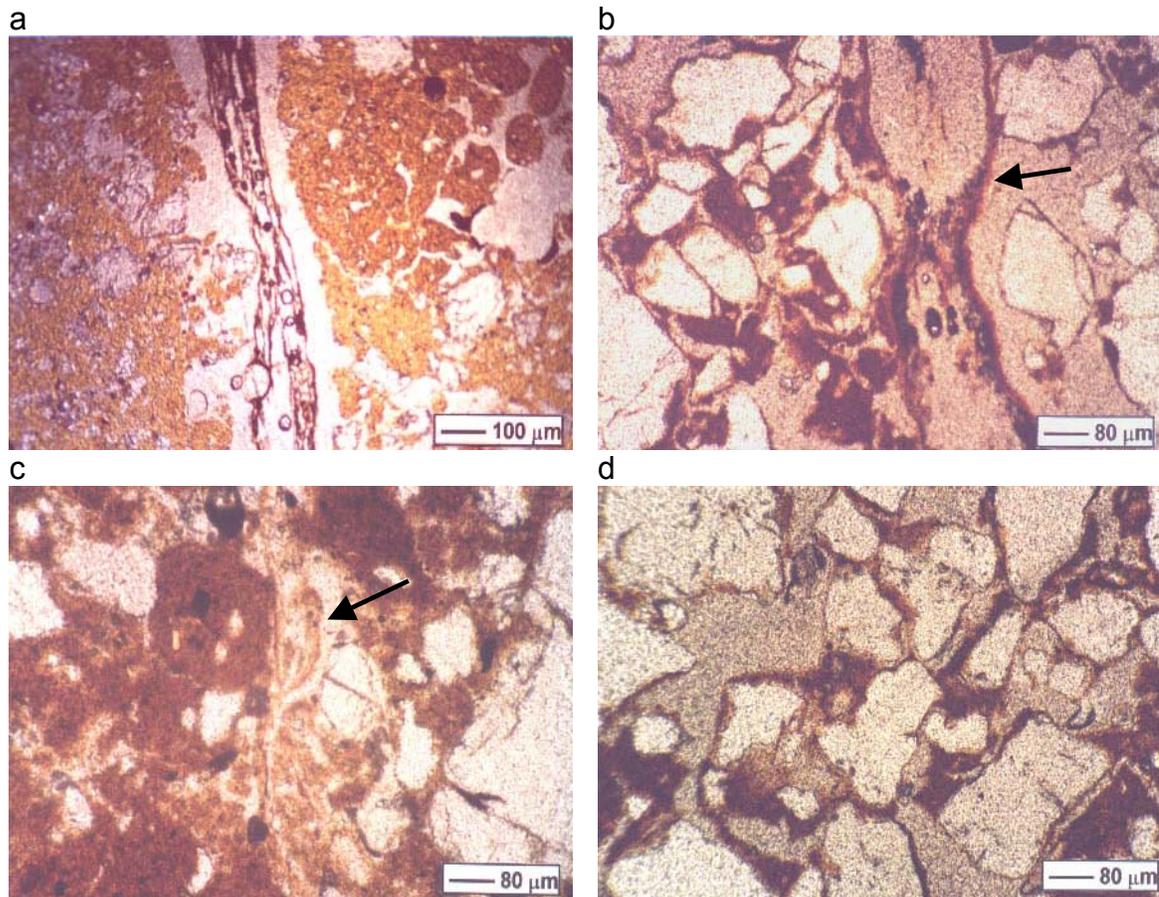


FIGURA 22. Micrografias obtidas com microscópio óptico mostrando feições de migração de partículas nos solos estudados. a) solo da mata, aspecto de raiz (MO particulada) dando origem a bioporo. b) solo sob sequeiro (0-0,2m), fração mais fina do solo com aspecto típico de migração através de bioporo. c) solo irrigado (0-0,2m), feição com aspecto típico de migração de partículas nos poros por entre agregados e grãos de quartzo. d) solo com vinhaça (0,2-0,4m), fração mais fina revestindo a superfície de grãos de areia.

fauna), é resultado da grande atividade biológica nas condições naturais do solo da mata.

Nas lâminas delgadas dos solos cultivados, no entanto, verificou-se a presença de poros com feições típicas que indicam a ocorrência de eluviação de materiais de granulometria mais fina através do perfil do solo (Figuras 22b e 22c).

Estas feições texturais se caracterizam por concentração de frações granulométricas mais fina (silte e argila), distinta do material adjacente (grãos de quartzo e agregados), com aspecto de escorrimento ou orientado, revestindo ou preenchendo as paredes dos poros, relacionando-as a mecanismos de transporte de partículas através do perfil do solo (Brewer, 1976; Cabrera-Martinez et al., 1989). As feições de argila iluvial também ocorrem através de revestimento dos grãos de quartzo na matriz do solo (Figura 22d), formando pontes de material mais fino entre eles (Brewer, 1976). Aspectos de iluviação de argila em solos cultivados também foram verificados por outros autores (Dantas et al., 1998; Silva et al., 1998). Penetrações de argila através de finos canais formados pelo avanço do crescimento de raízes de plantas com sistema radicular fasciculado também tem sido descrito na literatura (Cockroft et al., 1969), como um importante fenômeno de migração de argila.

No presente estudo, o maior teor de argila dispersa em água e a maior concentração crítica de flocculação, principalmente nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, evidenciaram o maior grau de dispersão da fração argila, o que favoreceu a sua migração através do perfil do solo.

5. CONCLUSÕES

O cultivo com cana-de-açúcar influenciou os atributos químicos do solo, causando redução nos teores de cálcio, magnésio e carbono orgânico, em relação ao solo da mata, observando-se que o solo sob manejo com vinhaça sofreu a menor degradação das condições químicas.

Os sistemas de manejo influenciaram os teores de argila e óxidos de ferro, silício e alumínio extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato, observando-se os maiores valores destes atributos nas camadas subsuperficiais dos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado.

A faixa de friabilidade e a umidade ótima de compactação do solo foram influenciados pelos sistemas de manejo, constatando-se os menores valores destes atributos nos sistemas sequeiro e irrigado.

Os sistemas de manejo e o teor de água do solo influenciaram a pressão de precompactação e a coesão do solo, observando-se os maiores valores destes atributos nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado, e nos teores de água mais baixos.

O cultivo do solo com cana-de-açúcar modificou a estrutura do solo e morfologia dos poros, apresentando associação da porosidade natural com poros aplanados, e um arranjo mais compacto das partículas no solo. Nos agregados dos solos cultivados constatou-se um aspecto maciço e orientação de partículas de argila, em relação ao solo da mata.

O cultivo com cana-de-açúcar influenciou os atributos físicos do solo, havendo redução da porosidade total, condutividade hidráulica saturada e estabilidade dos agregados em água e aumento da compactação e retenção de água do solo.

O teste de cisalhamento direto mostrou-se um instrumento importante para a quantificação da coesão dos solos de tabuleiros costeiros, já que a verificação da

coesão destes solos tem sido feita de forma subjetiva, na descrição morfológica do perfil do solo em campo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABO-GHOBAR, H.M. Influence of irrigation water quality on soil infiltration. **Irrigation Science**, New York, v.11, p.13-19, 1993.
- ALMEIDA, J.A.; KLANT, E.; KÄMPF, N. Gênese do contraste textural e da degradação do horizonte B de um Podzólico Vermelho-Amarelo da planície costeira do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.21, p. 221-233, 1997.
- AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering geology**, Amsterdam v. 62, p. 319-342, 2001.
- ARVIDSSON, J.; TRUTNER, A.; VAN DEN AKKER, J.J.H. et al. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.60, p.79-89, 2001.
- ASHBURNER, J.E.; SIMS, B.G. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. San José: IICA, 1984. 473 p.
- ASMED, S.; SWINDALE, L.D.; EL-SWAIFY, S.A. Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. I. Plastic limit, percentage stable aggregates, and hydraulic conductivity. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.20, p.255-268, 1969.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do limite e relação de contração de solos**. NBR-7183. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de adensamento unidimensional**. NBR-12007. Rio de Janeiro, 1990. 13 p.
- AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A.; FRANZLUEBBERS, A.J. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.60, p.1197-1201, 1996.
- BAL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. et al. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in Northeastern Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v.85, p.1004-1008, 1993.

- BARBIERI, J.L.; ALLEONI, L.R.F.; DONZELLI, J.L. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.21, p. 89-98, 1997.
- BARZEGAR, A.R.; ASOODAR, M.A.; ANSARI, M. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p.167-172, 2000.
- BAUMGARTL, T.; HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p.203-213, 1991.
- BAVER, L.D. **Soil Physics**. 3. ed. New York: John Wiley, 1966. 489 p.
- BENITES, V.M.; MENDONÇA, E.S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.22, p.215-221, 1998.
- BENKE, M.B. **Characterization and interaction of sugarcane agro-industry residue with soil, kaolinite and Fe-oxyhydroxides**. 1998. 139 f. Thesis (PhD) - University of Saskatchewan, Saskatoon, 1998.
- BLAIR, G.J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A.M. et al. Soil carbon changes resulting from trash management at two locations in Queensland, Australia and in Northeast Brazil. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 6, p.873-882, 1998.
- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugarcane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.55, p.183-191, 2000.
- BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- BOULET, R.; FRITSCH, E.; FILIZOLA, H.F. et al. Iron bands, fragipans and duripans in the northeastern plateaus of Brazil – properties and genesis. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.78, n.3, p.519-530, 1998.
- BRADFORD, V.M. The shear strength of a moderately well structured soil in its natural and remolded states. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.45, p.9-12, 1981.
- BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. New York: John Wiley, 1976. 482 p.

- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A. et al. **Handbook for soil thin section description**. Albrington, Reino Unido: Waine Reserch, 1985. 152 p.
- CABEDA, M.S.V. Degradação física e erosão do solo. In: SIMPÓSIO DE MANEJO DO SOLO E PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL, 3, 1984, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Univerdidade de Passo Fundo, 1984. p.28-33.
- CABEDA, M.S.V. **Fundamentos de física do solo**. Departamento de Solos da UFRGS, Faculdade de Agronomia, (Notas de Aula da Disciplina AGR 318 – Conservação do Solo), 1982. 21p.
- CABRERA-MARTINEZ, F.; HARRIS, W.G.; CARLISLE, V.W. et al. Partitioning of clay-sized minerals in coastal plains soils with sandy/loamy boundaries. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.53, p.1584-1587, 1989.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.
- CAMARGO, O.A.; BERTON, R.S.; GERALDI, R.N. et al. Alterações de características químicas de um Latossolo Roxo Distrófico incubado com resíduos da indústria álcool-açucareira. **Bragantia**, Campinas, v.43, n.1, p.125-139, 1984.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.; BERTON, R.S. et al. Características físicas de solo que recebeu vinhaça. **Boletim Científico do Instituto Agrônômico**, Campinas. v.14, 1988, 12 p.
- CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.56, p.777-783, 1992.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234 p.
- CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 1994. 106 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.14, p. 99-105, 1990.
- CARVALHO, S.R.; BRUAND, A.; HARDY, M. et al. Soil compaction of Ultisols (Podzólico Vermelho Amarelo) under sugar cane crops (State of Rio de Janeiro, Brasil). Interest of a combined analysis of porosity and mineral constitution. **Cahiers Orstom**, sér. Pedologie, Bondy, v. 26, n.3, p.195-212, 1991.

- CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M.F. et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.75, p.1-7, 2002.
- CERRI, C.C.; FELLER, C.; CHAUVEL, A. Evolução das principais propriedades de um latossolo vermelho escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinquenta anos com cana-de-açúcar. **Cahiers Orstom**, sér. Pedologie, Bondy, v. 26, n.1, p.37-50, 1991.
- CERRI, C.C.; POLO, A.; ANDREUX, F. et al. Resíduos orgânicos da agroindústria canaveira: 1. Características físicas e químicas. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v.6, p.34-37, 1988.
- CHAN, K.Y.; HULUGALLE, N.R. Changes in some soil properties due to tillage practices in rainfed hardsetting Alfisols and irrigated Vertisols of eastern Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 49-57, 1999.
- CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M.; RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hardsetting soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.54, p.1060-1067, 1990.
- CHARTRES, C.J.; NORTON, L. D. Micromorphological and chemical properties of Australian soils with hardsetting and duric horizons. **Development Soil Science**, Amsterdam, v.22, p.825-834, 1994.
- COCKROFT, B.; BARLEY, K.P.; GREACEN, E.L. The penetration of clays by fine probes and root tips. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.7, p.333-348, 1969.
- CONARACHA, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 56, p.185-196, 2000.
- CORSINI, P.C.; MALHEIROS, E.B.; SACHI, E. Sistemas de cultivo da cultura da cana-de-açúcar: efeitos na retenção de água e na porosidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, p.71-74, 1986.
- D'AGOSTINI, L.R. **Variações temporais da coesividade entre agregados de solo**. 1992. 82 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**: Physical and mineralogical methods. Part I. 2. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. p.443-460.
- DANTAS, J.A.; SANTOS, M.C.; HECK, R.J. Caracterização de podzólicos amarelos irrigados e não irrigados do submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.761-771, 1998.

- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.199-238, 1988.
- DEXTER, A.R.; CHAN, K.Y. Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations. **Journal of Soil Science**, London, v.42, p.219-226, 1991
- DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agriculture Engineering Research**, Amsterdam, v.31, p.139-147, 1985.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.45-51, 1999.
- DÌAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G.A. Effect of texture, organic carbon and water retention on the compactability of soil from Argentinean pampas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.121-126, 2000.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. (Ed.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: ASA/SSSA, 1994. p.3-21.
- DREES, L.R.; KARATHANASIS, A.D.; WILDING, L.P. et al. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.58, p.508-517, 1994.
- DUNCAN, M.M.; FRANZMEIER, D.P. Role of free silicon, aluminum and iron in fragipan formation. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.63, p.923-929, 1999.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises do solos**. Rio de Janeiro: SNCLS, 1997. 212 p.
- ETANA, A.; COMIA, R.A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.44, p.13-21, 1997.
- FILIZOLA, H.F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E. et al. Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do Nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.947-963, 2001.
- FITZPATRICK, E.A. **The micromorphology of soil**. Aberdeen: Department of Soil Science of the University of Aberdeen, 1984. 433 p.
- FLOATE, M.J.S. A chemical, physical and mineralogical study of soil developed on glacial lacustrine clays in north central British Columbia. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.46, p.227-236, 1966.

- FRANZLUEBBERS, A.J.; ARSHAD, M.A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.61, p.1382-1386, 1997.
- FRANZMEIER, D.P.; CHARTES, C.J.; WOOD, J.T. Hardsetting soils in Southeast Australia: landscape and profile processes. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.60, p.1178-1187, 1996.
- FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley, 1993. 517 p.
- FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O.; RHOADES, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.42, p.32-39, 1978.
- GAGGERO, M.R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- GENRO JÚNIOR, S.A.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J. et al. Relação da pressão de pré-consolidação com o estado inicial de compactação e grau de saturação em água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília. **Resumos...** Brasília: SBCS, 1999. p. 412.
- GIANLUPPI, D. **Morfologia e gênese de solos do Litoral-Norte do Estado do Rio Grande do Sul**. 1979. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; TORMENA, C. et al. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting. Estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.239-247, 2001.
- GLORIA, N.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado: Parte 1 e 2. **Álcool & Açúcar**, Piracicaba, v.4, p.24-35, 1984.
- GOLCHIN, A.; BALDOCK, J.A.; CLARKE, P. et al. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter of a volcanic ash soil as shown by ¹³C NMR spectroscopy. II. Density fractions. **Geoderma**, Amsterdam, v.76, p.175-192, 1997a.
- GOMES JÚNIOR., R.N. Degradação dos solos de tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, v.3, 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: SBCS, 1995. p. 1956-1957.
- GREENLAND, D.J.; WILD. A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics-from myth to complex reality. In: LAL, R. (Ed.) **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: ASA/SSSA, 1992. p.17-33.

- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.6, p.65-100, 1987.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A; VOORHEES, W.B. et al. **Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils**. Minnesota: Binational Agriculture Research Development, 1985. 178 p. Minnesota, 1985.
- GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.42, p.311-338, 1989.
- HAKANSSON, I. Soil Compaction control objectives, possibilities and prospects. **Soil technology**, Amsterdam, v.3, p.231-239, 1990.
- HAKANSSON, I.; REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle-load extent, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.29, p.277-304, 1994.
- HELALIA, A.M.; LETEY, J.; GRAHAM, R.C. Crust formation and clay migration effects on infiltration rate. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.52, p.251-255, 1988.
- HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.54, p.161-166, 1990.
- HILL, R.L.; HORTON, R.; CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.49, p.1264-1270, 1985.
- HILL, R.L.; MEZA-MONTALVO, M. Long-term wheel traffic effects on soil physical properties under different tillage systems. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.54, p.865-870, 1990.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413 p.
- HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre:Convênio UFRGS-USAID / Wisconsin, 1970. 231 p.
- HOLANDA, J.S.; AMORIM, J.R.A. Qualidade da água para irrigação. In: Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: SBEA, 1997. p. 383.
- HOLE, F.D. Effects of animals on soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.25, p.75-122, 1981.
- HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

- HORN, R.; DOMZAL, H.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p. 23-36, 1995.
- HOWARD, R.F.; SINGER, M.J.; FRANTZ, G.A. Effects of soil properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.45, p.231-236, 1981.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis**: advanced course. 2. ed. Madison: Department of Soil University Wisconsin, 1965. 991 p.
- JACOMINE, P.K.T. **Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos de Estado de Alagoas**. Recife: EMBRAPA/Centro de Pesquisas Pedológicas: SUDENE-DRN, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35)
- JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: "Pesquisa & Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros", 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA/CPATC/CNPMF/IGUFBA, 1996. p.13-24.
- JONGERIUS, A.; HEINTZBERGER, G. **The preparation of mammoth-sized thin sections**. Wageningen: Soil Survey Institute, 1963. p.3-37. (Soil Survey Paper, 1).
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size Distribution of Aggregates. In: **Methods of soil analysis**. Part I: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.498-519.
- KIMPE, C.R.; LAVERDIERE, M.R.; DEJOU, J. Distribution of silica, sesquioxides, and clay in Quebec podzolic soils and their effects on subsoil cementation. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.47, p.838-840, 1983.
- KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição de diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 26, p. 857-867, 2002.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999a.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.497-506, 1999b.
- KOOLEN, A.J.; KUIPERS, H. **Agricultural soil mechanics**. New York: Springer, 1983. 241 p.
- LAMBE, T.W. **Soil testing for engineers**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1951. 165p.

- LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics, SI version**. New York: John Wiley, 1979. 553 p.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.44, p.450-457, 1980.
- LEAL, J.R.; AMARAL SOBRINHO, N.M.R.; VELLOSO, A.C.X. et al. Potencial redox e pH: variações em um solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.257-261, 1983.
- LEBERT, M.; HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.275-286, 1991.
- LHOTSKY, J.; BERAN, P.; PARIS, P. et al. Degradation of soil by increasing compression. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.287-295, 1991.
- LIMA JÚNIOR, M.A. **Nitrogen nutrition of sugarcane in N.E. of Brazil**. 1982. 172 f. Thesis (PhD) - University of Saskatchewan, Saskatoon, 1982.
- LIMA, L. A. Efeitos de sais no solo e na planta. In: Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: SBEA, 1997. p. 383.
- LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; WU, L. et al. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.54, p.1096-1101, 1990.
- LOPES, E.S.; PERON, S.C.; PORTUGAL, E.P. et al. Atividade respiratória de solo tratado com vinhaça e herbicida. **Bragantia**, Campinas, v.45, p.205-210, 1986.
- MACEDO, V.R.M. **Compressibilidade de um podzólico vermelho-escuro fisicamente degradado e recuperado**. 1993. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.
- MACHADO, A.L.T. **Esforço de tração para ferramentas de hastes com ponteiros estreitas em dois solos do Rio Grandes do Sul**. 2001. 175 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- MACHADO, A.L.T.; TREIN, C.R. Ângulo de atrito interno e coesão como avaliadores do estado de compactação de um Planossolo (Albaqualf). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília. **Resumos...** Brasília: SBCS, 1999. CD-ROM

- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. et al. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.49, p.185-199, 1998.
- MASILACA, A.S.; PRASAD, R.A.; MORRISON, K.J. The impact of sugar-cane cultivation on three oxisols from Vanu Levu, Fiji. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v.63, n.4, p.325-330, 1986.
- McCORMACK, D.E.; WILDING, L.P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.43, p.167-173, 1979.
- McKEAGUE, J. A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.46, p.13-22, 1966.
- McKEAGUE, J.A.; SPROUT, P.N. Cemented subsoils (Duric Horizons) in some soils of British Columbia. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.55, p.189-203, 1975.
- McKYES, E.; NYAMUGAFATA, P.; NYAMAPFENE, K.W. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.29, p.357-366, 1994.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Proceedings Clays & Clay Mineral Conference**, v.7, London, 1960. p. 317-327.
- MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C. et al. Propriedades químicas e biológicas de solos de tabuleiros cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.201-207, 2000.
- MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley, 1976. 422 p.
- MONTOVANI, E.C. **Compactação do solo**. V curso de uso e manejo da irrigação. Sete Lagoas, MG: Embrapa/CNPMS, 1990. 11 p.
- MOODY, I.E.; GRAHAM, R.C. Silica-cemented terrace edges, Central California Coast. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.61, p.1723-1729, 1997.
- MULLINS, C.E.; MacLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H. et al. Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. **Advances in Soil Science**, London, v.11, p.37-108, 1990.
- MUNNER, M.; OADES, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.29, p.411-423, 1989.

- MURPHY, C.P. **Thin section preparation of soil and sediments**. Beskhamsted, Herts, UK: A. B. Academic Publishers, 1986. 149 p.
- NETTLETON, W.D.; BRASHER, B.R. Correlation of clay minerals and properties of soils in the Western United States. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.47, p.1032-1036, 1983.
- NIELSEN, D.R.; JACKSON, R.D.; CARY, J.W. et al. **Soil water**. Madison: American Society of Agronomy, 1972. 175 p.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE-DERNA, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422 p.
- NUNES, M.L.; KLAMT, E.; REICHERT, J.M. et al. Características de solos sistematizados em duas áreas cultivadas com arroz sob inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.395-406, 2002.
- NUNES, M.R.; VELLOSO, A.C.X.; LEAL, J.R. Efeito da vinhaça nos cátions trocáveis e outros elementos químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.16, p.171-176, 1981.
- ODELL, R.T.; THORNBURN, T.H.; MCKENZIE, L.J. Relationships of Atterberg limits to some other properties of Illinois soils. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v.24, p.297-300, 1960.
- OLIVEIRA, C.V.; KER, J.C.; DUARTE, M.N. et al. Atributos micromorfológicos de solo do projeto Jaíba, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.117-128, 2000.
- ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JR., E.; AGUJARU, R. et al. Efeito da aplicação prolongada da vinhaça nas propriedades químicas dos solos com cana-de-açúcar : estudo exploratório. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v.1, p.28-33, 1983.
- ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995. 378 p.
- PAGLIAI, M. Micromorphometric and micromorphological investigation on the effect of compaction by pressures and deformations resulting from tillage and wheel traffic. In: MONNIER, G.; GOSS, M.J. (Eds.) **Compaction and Regeneration**. Rotterdam: Academic Publishers, 1987. p.31-38.
- PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar**. Cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. II. 432p.
- PEREIRA, J.R.; SIQUEIRA, F.B. Alterações nas características químicas de um oxissolo sob irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.14, p.189-195, 1979.
- PILLON, C.N. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de cultura em plantio direto**. 2000. 232 f. Tese

(Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247 p.

PROSPED. **Levantamento detalhado dos solos da Usina Triunfo na escala de 1:10.000**. Boca da Mata, AL, 1992. (Relatório Geral).

RACHID, M.; SABER, N.; EL-BRAHLI, A. et al. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.57, p.225-235, 2001.

RENGASAMY, P. Clay dispersion in relation to changes in the electrolyte composition of dialysed red-brown earths. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.34, p.723-732, 1983.

RIBEIRO, A.C.; SENGIK, E. Efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades físicas e químicas de duas amostras de Latossolos. **Revista Ceres**, Campinas, v.30, n.167, p.25-31, 1983.

ROCHA, W.W.; DIAS JÚNIOR, M.S.; LIMA, J.M. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.297-303, 2002.

ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C.; MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um latossolo roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.241-248, 1991.

RUBIN, R.B.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. et al. Compressibilidade de um podzólico vermelho-amarelo, textura superficial franca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília. **Resumos...** Brasília: SBCS, 1999. CD-ROM

RUSSO, D.; BRESLER, E. Effect of mixed Na/Ca solutions on the hydraulic properties of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.41, p.713-717, 1977.

SCHJONNING, P. Shear strength determination in undisturbed soil at controlled water potential. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.8, p.171-179, 1986

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, p.251-255, 1983.

SENGIK, E.; RIBEIRO, A.C.; CONDE, A.R. Efeito da vinhaça em algumas propriedades, amostras de dois solos de Viçosa (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, p.11-12, 1988.

- SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter stabilization in two semiarid tropical soils: size, density, and magnetic separations. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.62, p.1247-1257, 1998.
- SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R.; MERMUT, A.R. et al. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolos Amarelos coesos do Estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.515-525, 1998.
- SILVA, I. de F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.
- SILVA, M.S.L. **Caracterização e gênese do adensamento subsuperficial em solos de tabuleiros do semi-árido do Nordeste do Brasil**. 2000. 126 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- SILVA, M.S.L.; RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiros do Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.397-402, 1992.
- SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.219-226, 1999.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 26, p.9-15, 2002a.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 24, p.239-249, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 26, p.1-8, 2002b.
- SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.335-354, 1997.
- SMITH, C.W.; HADAS, A.; DAN, J. et al. Shrinkage and atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. **Geoderma**, Amsterdam, v.35, p. 47-65, 1985.

- SOANE, B. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.
- SOANE, B.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. et al. Compaction by agricultural vehicles: a review I. soil and wheel characteristics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.1, p.207-237, 1981.
- SOUZA, L.S. Uso e manejo dos solos coesos dos tabuleiros costeiros In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: "Pesquisa & Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros", 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA/CPATC/CNPMF/IGUFBA, 1996. p.36-74.
- SOWERS, G.F. Consistency. In: BLACK, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. part 1. p.391-399.
- SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. New York: Academic Press, 1995. 267p.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.
- STARTSEV, A.D.; McNABB, D.H. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten parameter of boreal forest soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.65, p.224-231, 2001.
- STEINHARDT, G.C.; FRANZMEIER, D.P.; NORTON, L.D. Silica associated with fragipan and non-fragipan horizons. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.46, p.656-657, 1982.
- STONE, J.O.; LARSON, W.E. Rebound of five one-dimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.44, p.819-822, 1980.
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P. Características físico-hídricas e químicas de um latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.18, p. 533-539, 1994.
- TEDESCO, M.J.; GIANELO, C.; BISSANI, C. A. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 188p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- THOMAS, G.W.; HASZLER, G.R.; BLEVINS, R.L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test. **Soil Science**, Baltimore, v.161, n.8, p.502-508, 1996.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.17, n.3, p.429-441, 1979.

- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.33, p.141-163, 1982.
- UCHA, J.M. & RIBEIRO, L.P. Comportamento de um solo do cerrado baiano sob uso agrícola em regime de sequeiro e irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Goiania. **Resumos...** Goiania: SBCS, 1995. p.423.
- UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Age hardening of agricultural top soils. **Journal of Soil Science**, London, v.32, p.335-350, 1981.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- VANDENBYGAART, A.J.; PROTZ, R.; TOMLIN, A.D. et al. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.51, p.139-149, 1999.
- VOMOCIL, J.A. Porosity. In: BLACK, C.A. (ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: America Society Agronomy, 1965. Part I. p.299-314.
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel by traffic in the Northern corn belt. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.42, p.344-349, 1978.
- WIERMANN, C.; WERNER, D.; HORN, R. et al. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.117-128, 2000.
- YAVUSCAN, H.G. Wheel traffic impact on soil conditions as influenced by tillage system in Central Anatolia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.129-138, 2000.
- YAVUSCAN, H.G; VATANDAS, M.; GÜRHAN, R. Soil strength as affected by tillage system and wheel traffic in wheat-corn rotation in central Anatolia. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v.39, p.23-34,2002.

7. APÊNDICES

APÊNDICE 1 Descrição morfológica do solo sob mata nativa.

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO AMARELO Coeso latossólico A moderado textura média/argilosa fase floresta subperenifólia relevo plano.

LOCALIZAÇÃO: Mata nativa de fornecedor da Usina Triunfo, próximo ao lote 2408 da Fazenda Alvorada, Município de Boca da Mata, AL.

SITUAÇÃO E DECLIVIDADE: Topo plano de baixo platô costeiro com 0 - 2,5 % de declividade.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA: Terciário, Formação Barreiras.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos areno-argilosos.

PEDREGOSIDADE: Ausente.

ROCHOSIDADE: Ausente.

RELEVO REGIONAL: Plano / Suave Ondulado

RELEVO LOCAL: Plano.

EROSÃO: Nula.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta subperenifólia.

USO ATUAL: Floresta subperenifólia (área de preservação).

CLIMA: As' de köppen (tropical com verão seco)

Oo 0,03 - 0 m; horizonte formado por restos vegetais pouco decomposto.

A 0,0 -0,21 m; bruno escuro (10 YR 4/3, úmido) e bruno amarelado (10YR 5/4, seco); franco argilo-arenosa; moderada pequena a média e granular; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição clara e plana.

AB 0,21 - 0,42m; bruno amarelado escuro (10 YR 4/4, úmido) e bruno amarelado (10YR 5/4, seco); argilo-arenosa; fraca pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e pegajoso; transição clara e plana.

Bt₁ 0,42 - 0,83 m; bruno amarelado (10 YR 5/4, úmido); argila-arenosa; maciça coesa; duro, firme, plástico e pegajoso; transição difusa e plana.

Bt₂ 0,83 -1,41 m; bruno amarelado (10 YR 5/6, úmido); argilosa; fraca pequena a média blocos subangulares; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico e pegajoso; transição difusa e plana.

Bt₃ 1,41- 2,05 m+; amarelo brunado (10 YR 6/8, úmido), mosqueado pouco médio e distinto vermelho amarelo (5 YR 4/6, úmido); argilosa; fraca pequena a média blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, ligeiramente plástico e pegajoso.

Raízes: Muitas em A e AB; comuns em Bt₁ e Bt₂ e poucas em Bt₃.

Poros: Muitos em A e AB, comuns em Bt₁ e poucos em Bt₂ e Bt₃

Observações: Aspecto maciço em alguns pontos do horizonte Bt₂.

APÊNDICE 1 (Continuação). Análise física e química do solo sob mata nativa

Horizonte	Profundidade m	Composição Granulométrica			Argila dispersa em água
		Areia	Silte	Argila	
		-----g kg ⁻¹ -----			
A	0,0-0,21	644	122	234	96
AB	0,21-0,42	621	116	263	104
Bt1	0,42-0,83	561	27	412	93
Bt2	0,83-1,41	506	67	427	54
Bt3	1,41-2,00	514	38	448	22

Horizonte	Grau de Floculação %	Relação silte/argila	Densidade		Porosidade Total m ³ m ⁻³
			Solo	Partícula	
			-----Mg m ⁻³ -----		
A	59	0,5	1,29	2,63	0,509
AB	66	0,2	1,41	2,68	0,473
Bt1	77	0,1	1,38	2,68	0,485
Bt2	87	0,2	1,35	2,7	0,501
Bt3	95	0,1	1,25	2,8	0,554

Horizonte	pH (H ₂ O)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
A	4,8	2,91	2,79	0,05	0,12
AB	4,9	1,34	1,71	0,01	0,10
Bt1	5,3	0,80	0,62	0,01	0,02
Bt2	5	0,3	0,38	0,01	0,01
Bt3	4,8	0,19	0,25	0,01	0,01

Horizonte	Al ³⁺	H ⁺	Valor S %	Valor T	C
A	1,78	6,54	5,87	12,84	28,1
AB	1,67	5,09	3,16	8,72	17,1
Bt1	1,33	4,13	1,45	6,90	5,8
Bt2	1,44	3,59	0,7	5,73	3,6
Bt3	1,72	3,17	0,46	5,35	2,8

APÊNDICE 2. Análise de variância dos parâmetros cálcio, magnésio, potássio e saturação por sódio para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
		Cálcio (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	2,325	1,300
Resíduo	12			
		Cálcio (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00001	2,260	3,260
Resíduo	12			
		Cálcio (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,00001	0,769	3,992
Resíduo	12			
		Magnésio (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	2,132	1,152
Resíduo	12			
		Magnésio (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00001	1,404	2,850
Resíduo	12			
		Magnésio (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,00001	0,704	4,001
Resíduo	12			
		Potássio (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	0,292	3,462
Resíduo	12			
		Potássio (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00001	0,142	8,474
Resíduo	12			
		Potássio (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,00001	0,091	8,276
Resíduo	12			
		Saturação por sódio (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	0,910	7,395
Resíduo	12			
		Saturação por sódio (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00001	0,744	21,558
Resíduo	12			
		Saturação por sódio (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,00001	0,676	24,172
Resíduo	12			

APÊNDICE 3. Análise de variância dos parâmetros capacidade de troca de cátions efetiva (CTC efetiva), condutividade elétrica (CE), pH em água e concentração crítica de floculação (CCF) para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
			CTC efetiva (camada 0-0,2m)	
Manejo	3	0,00001	9,916	3,446
Resíduo	12			
			CTC efetiva (camada 0,2-0,4m)	
Manejo	3	0,00001	6,512	3,828
Resíduo	12			
			CTC efetiva (camada 0,4-0,8m)	
Manejo	3	0,00001	5,587	3,195
Resíduo	12			
			CE (camada 0-0,2m)	
Manejo	3	0,00001	0,274	5,057
Resíduo	12			
			CE (camada 0,2-0,4m)	
Manejo	3	0,00099	0,189	11,394
Resíduo	12			
			CE (camada 0,4-0,8m)	
Manejo	3	0,13778	0,146	10,536
Resíduo	12			
			pH em água (camada 0-0,2m)	
Manejo	3	0,00008	5,115	1,556
Resíduo	12			
			pH em água (camada 0,2-0,4m)	
Manejo	3	0,00047	5,122	1,356
Resíduo	12			
			pH em água (camada 0,4-0,8m)	
Manejo	3	0,1579	5,2537	1,233
Resíduo	12			
			CCF (camada 0-0,2m)	
Manejo	3	0,00001	1,994	7,203
Resíduo	12			
			CCF (camada 0,2-0,4m)	
Manejo	3	0,00011	2,050	6,899
Resíduo	12			
			CCF (camada 0,4-0,8m)	
Manejo	3	0,16729	0,210	5,499
Resíduo	12			

APÊNDICE 4. Análise de variância dos parâmetros carbono orgânico total (COT), carbono na MO particulada, carbono na MO associada aos minerais para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
		COT (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	19,877	6,093
Resíduo	12			
		COT (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00004	12,644	10,486
Resíduo	12			
		COT (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,00654	6,446	15,485
Resíduo	12			
		Carbono na MO particulada (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	5,804	12,467
Resíduo	12			
		Carbono na MO particulada (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00002	2,107	16,775
Resíduo	12			
		Carbono na MO particulada (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,990	0,661	53,045
Resíduo	12			
		Carbono na MO associada aos minerais (camada 0-0,2m)		
Manejo	3	0,00001	14,068	5,029
Resíduo	12			
		Carbono na MO associada aos minerais (camada 0,2-0,4m)		
Manejo	3	0,00012	10,531	10,675
Resíduo	12			
		Carbono na MO associada aos minerais (camada 0,4-0,8m)		
Manejo	3	0,00002	5,775	4,609
Resíduo	12			

APÊNDICE 5. Análise de variância dos parâmetros limite de plasticidade, limite de contração e faixa de friabilidade para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
	Limite de plasticidade (camada 0-0,2m)			
Manejo	3	0,00002	0,1650	5,467
Resíduo	12			
	Limite de plasticidade (camada 0,2-0,4m)			
Manejo	3	0,00159	0,1774	6,641
Resíduo	12			
	Limite de plasticidade (camada 0,4-0,8m)			
Manejo	3	0,5612	0,225	5,027
Resíduo	12			
	Limite de contração (camada 0-0,2m)			
Manejo	3	0,8463	0,1098	9,810
Resíduo	12			
	Limite de contração (camada 0,2-0,4m)			
Manejo	3	0,9968	0,1098	10,364
Resíduo	12			
	Limite de contração (camada 0,4-0,8m)			
Manejo	3	0,9407	0,1035	12,105
Resíduo	12			
	Faixa de friabilidade (camada 0-0,2m)			
Manejo	3	0,00082	0,055	27,261
Resíduo	12			
	Faixa de friabilidade (camada 0,2-0,4m)			
Manejo	3	0,00217	0,0677	17,809
Resíduo	12			
	Faixa de friabilidade (camada 0,4-0,8m)			
Manejo	3	0,8875	0,1216	14,258
Resíduo	12			

APÊNDICE 6. Análise de variância dos parâmetros densidade do solo, umidade ótima de compactação e densidade máxima de compactação para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
	Densidade do solo (camada 0-0,2m)			
Manejo	3	0,00013	1,4652	4,107
Resíduo	12			
	Densidade do solo (camada 0,2-0,4m)			
Manejo	3	0,00061	1,5084	3,907
Resíduo	12			
	Densidade do solo (camada 0,4-0,8m)			
Manejo	3	0,00041	1,4864	4,131
Resíduo	12			
	Umidade ótima de compactação (camada 0-0,2m)			
Manejo	3	0,00011	0,1567	3,281
Resíduo	8			
	Umidade ótima de compactação (camada 0,2-0,4m)			
Manejo	3	0,2671	0,1706	5,246
Resíduo	8			
	Umidade ótima de compactação (camada 0,4-0,8m)			
Manejo	3	0,5497	0,1840	4,606
Resíduo	8			
	Densidade máxima de compactação (camada 0-0,2m)			
Manejo	3	0,0013	1,7850	1,314
Resíduo	8			
	Densidade máxima de compactação (camada 0,2-0,4m)			
Manejo	3	0,1093	1,7183	1,234
Resíduo	8			
	Densidade máxima de compactação (camada 0,4-0,8m)			
Manejo	3	0,2774	1,663	1,979
Resíduo	8			

APÊNDICE 7 Parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten para os solos sob os sistemas mata nativa (MN), sequeiro (CS), irrigado (CI) e com vinhaça (CV) nos tratamentos estudados.

camada (m)	α kPa ⁻¹	m	n	θ_r m ³ m ⁻³	θ_s m ³ m ⁻³	R ²
MN						
0-0,2	2,982	0,349	1,536	0,119	0,509	0,926
0,2-0,4	1,763	0,404	1,678	0,126	0,473	0,901
0,4-0,8	1,213	0,387	1,633	0,128	0,483	0,942
CS						
0-0,2	0,868	0,433	1,765	0,122	0,405	0,906
0,2-0,4	0,672	0,474	1,899	0,129	0,427	0,888
0,4-0,8	0,492	0,453	1,828	0,134	0,422	0,928
CI						
0-0,2	1,180	0,426	1,744	0,123	0,423	0,908
0,2-0,4	0,420	0,529	2,125	0,132	0,406	0,869
0,4-0,8	0,347	0,507	2,028	0,138	0,410	0,933
CV						
0-0,2	1,050	0,395	1,654	0,117	0,461	0,851
0,2-0,4	0,863	0,446	1,805	0,123	0,455	0,883
0,4-0,8	0,720	0,400	1,666	0,126	0,479	0,913

APÊNDICE 9. Análise de variância dos parâmetros coesão do solo e ângulo de atrito interno para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
			Coesão do solo (camada 0,2-0,4m; $U_g=0,08 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00129	117,625	10,792
Resíduo	8			
			Coesão do solo (camada 0,2-0,4m; $U_g=0,11 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,0067	65,150	13,731
Resíduo	8			
			Coesão do solo (camada 0,2-0,4m; $U_g=0,14 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,35021	32,666	26,347
Resíduo	8			
			Coesão do solo (camada 0,4-0,8m; $U_g=0,08 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00163	225,625	8,626
Resíduo	8			
			Coesão do solo (camada 0,4-0,8m; $U_g=0,11 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,01342	95,683	16,918
Resíduo	8			
			Coesão do solo (camada 0,4-0,8m; $U_g=0,14 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,09185	46,599	19,023
Resíduo	8			
			Ângulo de atrito interno (camada 0,2-0,4m)	
Manejo	3	0,00280	36,567	6,800
Resíduo	8			
			Ângulo de atrito interno (camada 0,4-0,8m)	
Manejo	3	0,41812	26,782	8,859
Resíduo	8			

APÊNDICE 10. Equações de regressão correspondentes a coesão do solo (C, kPa) em função da umidade gravimétrica do solo (U_g , kg kg^{-1}) nos tratamentos estudados.

Sistema de Manejo	Camada	
	0-0,2 m	
Mata nativa	$C = -101,06 \text{ Ln } (U_g) - 172,96$	$R^2 = 0,966^{**}$
Sequeiro	$C = -187,91 \text{ Ln } (U_g) - 300,44;$	$R^2 = 0,967^{**}$
Irrigado	$C = -174,33 \text{ Ln } (U_g) - 306,22;$	$R^2 = 0,967^{**}$
Vinhaça	$C = -132,09 \text{ Ln } (U_g) - 230,01;$	$R^2 = 0,848^{**}$
	0,2-0,4 m	
Mata nativa	$C = -241,93 \text{ Ln } (U_g) - 448,85;$	$R^2 = 0,848^{**}$
Sequeiro	$C = -348,45 \text{ Ln } (U_g) - 639,42;$	$R^2 = 0,899^{**}$
Irrigado	$C = -525,15 \text{ Ln } (U_g) - 1068,68;$	$R^2 = 0,889^{**}$
Vinhaça	$C = -288,48 \text{ Ln } (U_g) - 526,89;$	$R^2 = 0,941^{**}$

APÊNDICE 11. Análise de variância do parâmetro pressão de precompactação do solo para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,08 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00170	136,062	6,499
Resíduo	12			
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,11 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,01282	124,438	8,244
Resíduo	12			
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,14 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,07661	92,75	9,943
Resíduo	12			
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,19 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00003	42,125	17,784
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,08 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,02068	153,187	10,170
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,11 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,02385	132,562	11,642
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,14 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,55526	103,500	11,646
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,19 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00834	49,625	27,956
Resíduo	12			

APÊNDICE 12. Análise de variância do parâmetro índice de compressão do solo para as médias de manejo dentro de cada profundidade.

Quadro de Análise de Variância				
Causa de Variação	GL	Prob > F	Média Geral	CV
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,08 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00002	0,17887	8,394
Resíduo	12			
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,11 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00001	0,2045	7,442
Resíduo	12			
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,14 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00001	0,24706	6,294
Resíduo	12			
			(camada 0-0,2m; $U_g=0,19 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00001	0,2345	7,031
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,08 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00028	0,1862	8,806
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,11 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,00021	0,2211	14,565
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,14 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,0140	0,2771	5,622
Resíduo	12			
			(camada 0,2-0,4m; $U_g=0,19 \text{ kg kg}^{-1}$)	
Manejo	3	0,0392	0,28269	7,309
Resíduo	12			

APÊNDICE 13. Equações de regressão correspondentes a pressão de precompactação (P_{pc} , kPa) em função da umidade gravimétrica do solo (U_g , kg kg^{-1}) nos tratamentos estudados.

Sistema de Manejo	Camada
	0-0,2 m
Mata nativa	$P_{pc} = - 51,841 \text{ Ln } (U_g) - 5,962; R^2 = 0,770^{**}$
Sequeiro	$P_{pc} = -143,56 \text{ Ln } (U_g) - 200,65; R^2 = 0,890^{**}$
Irrigado	$P_{pc} = -139,28 \text{ Ln } (U_g) - 192,32; R^2 = 0,892^{**}$
Vinhaça	$P_{pc} = - 100,59 \text{ Ln } (U_g) - 113,67; R^2 = 0,902^{**}$
	0,2-0,4 m
Mata nativa	$P_{pc} = - 80,835 \text{ Ln } (U_g) - 63,785; R^2 = 0,754^{**}$
Sequeiro	$P_{pc} = - 149,92 \text{ Ln } (U_g) - 202,329; R^2 = 0,881^{**}$
Irrigado	$P_{pc} = -157,256 \text{ Ln } (U_g) - 212,742; R^2 = 0,925^{**}$
Vinhaça	$P_{pc} = - 97,353 \text{ Ln } (U_g) - 95,155; R^2 = 0,949^{**}$