

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PENAMBUCO
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE E QUALIDADE DE UM ARGISSOLO
AMARELO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS TABULEIROS
COSTEIROS DE ALAGOAS**

EDSON PATTO PACHECO
Engenheiro Agrônomo (UFLA)
Mestre em Engenharia Agrícola – Mecanização agrícola (UFV)

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

Orientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

FEVEREIRO - 2010

Ficha catalográfica

P116e Pacheco, Edson Patto
Estudo da compressibilidade e qualidade de um
argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos
tabuleiros costeiros de Alagoas / Edson Patto Pacheco.
– 2010.
106 f.: il.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice.
Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia,
Recife, 2010.
Referências.

1. Compactação do solo 2. Atributos físicos
3. Pressão de preconsolidação 4. Resistência a penetração
5. Matéria orgânica do solo
I. Cantalice, José Ramon Barros, orientador. II. Título.

CDD 631.4

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PENAMBUCO
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Tese de Doutorado

**ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE E QUALIDADE DE UM ARGISSOLO
AMARELO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NOS TABULEIROS
COSTEIROS DE ALAGOAS**

Elaborada por

EDSON PATTO PACHECO

Como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice
(Orientador/Presidente)

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Prof. Dr. Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos

Dr. Marcelo Ferreira Fernandes

Prof. Dr. Apolino José Nogueira da Silva

DEDICO,

A minha mãe Consuelo Pereira Patto Pacheco “in memoriam”, que em vida tanto acreditou na minha capacidade, mas infelizmente não pode presenciar a conclusão dessa importante etapa da minha vida profissional.

Ao meu pai Edson Bolívar Pacheco, a quem segui a mesma área de atuação dentro da engenharia agrônoma.

A minha esposa Ana da Silva Lédo e minha filha Maria Clara Lédo Pacheco pela paciência e incentivo necessários para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Deus, por me conceder saúde, disposição e lucidez.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade e pelos ensinamentos.

A Embrapa Tabuleiros Costeiros, pela concessão do meu afastamento e credibilidade a mim depositada.

Ao Professor José Ramon Barros Cantalice, pelos ensinamentos, orientação, compreensão, dedicação e amizade, que tornaram possível a realização dessa etapa da minha vida profissional. O meu muito obrigado.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos ensinamentos acadêmicos.

Ao pesquisador Dr. Fernando Luis Cintra Dultra pela co-orientação na elaboração do projeto, definição dos tratamentos, orientações laboratoriais e sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao pesquisador Dr. João Bosco Vasconcellos Gomes, pela amizade, dedicação e presteza durante a caracterização pedológica das áreas estudadas, bem como, pela sensibilidade da necessidade e viabilização da aquisição de equipamentos e materiais, sem os quais, não seria possível a realização deste trabalho.

Ao pesquisador Dr. Marcelo Ferreira Fernandes, pela amizade, orientação estatística e importantes sugestões, sem as quais, as análises dos dados e elaboração deste documento ficariam comprometidas.

A Usina Coruripe, pela disponibilização de áreas de mata e cultivadas com cana-de-açúcar, bem como, todo apoio logístico para coleta das amostras de solo essenciais para elaboração deste trabalho.

Aos Professores Dr. Yuri Daniel Jatobá Costa e Dr. Apolino José Nogueira da Silva e, os pesquisadores Dr. João Bosco Vasconcellos Gomes e Dr. Ademar Barros da Silva, pelas valiosas sugestões por ocasião do exame de qualificação.

Aos Professores Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, Dr. Romero Bezzerra de Vasconcelos, Dr. Apolino José Nogueira da Silva e ao pesquisador Dr. Marcelo Ferreira Fernandes pelas contribuições prestadas como membros da banca examinadora de defesa de tese.

Aos colegas Roberto Alves, Robson Dantas e Robinson Cruz, pela colaboração e orientação durante as análises de laboratório.

Aos colegas dos setores administrativos, biblioteca, informática, de recursos humanos, de máquinas e veículos e de serviços gerais da Embrapa Tabuleiros Costeiros, pelo apoio necessário em todas as etapas deste treinamento.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, pelo convívio e amizade, em especial aos contemporâneos Moacyr Cunha e Rogério Melo.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, pela dedicação e presteza aos alunos, em especial a secretária Sra. Maria do Socorro Santana.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente tornaram possível a realização de mais este trabalho.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
OBJETIVO GERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
REVISÃO DE LITERATURA	4
1 – Compactação do Solo	4
1.1 Avaliação da Compactação do Solo	5
2 – Compressibilidade e Compactação de Solos Agrícolas	7
3 – Fatores Determinantes da Compressibilidade do Solo	13
4 – Uso e Manejo dos Solos de Tabuleiros Costeiros	18
5 – Qualidade do Solo	24
MATERIAL E MÉTODOS	27
1 – Localização e Caracterização das Áreas Experimentais	27
2 – Amostragem do Solo	29
3 – Análises Físicas do Solo	29
3.1 Granulometria e Grau de Floculação	30
3.2 Densidade de Partícula	31
3.3 Estabilidade de Agregados em Água	32
3.4 Curva Característica de Retenção de Água no Solo	35
3.5 Densidade do Solo e Porosidade	36
3.6 Resistência do Solo à Penetração em Laboratório	36
3.7 Intervalo Hídrico Ótimo	37
3.8 Ensaio de Compressibilidade	38
3.9 Densidade Máxima, Umidade Crítica e Grau de Compactação	38
3.10 Condutividade Hidráulica Saturada	41
4 – Matéria Orgânica	41
4.1 Matéria Orgânica Total	41
4.2 Matéria Orgânica Particulada	42
4.3 Matéria Orgânica Complexada	43
4.4 Porcentagem de Matéria Orgânica Particulada e Complexada	43
5 – Análise dos Dados	43
RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
1 – Caracterização granulométrica e grau de floculação das áreas estudadas	45
2 – Efeito do cultivo da cana-de-açúcar sobre a pressão de pré-compactação, resistência mecânica à penetração e intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo	48
2.1 Horizonte A ou Ap (0 a 20 cm)	48
2.2 Horizonte AB (20 a 40 cm)	54
2.3 Horizonte Bt (40 a 60 cm)	61

3 – Correlações lineares da pressão de pré-compactação e da resistência mecânica à penetração com atributos físicos e matéria orgânica do solo	66
3.1 Horizonte A ou Ap (0 a 20 cm)	66
3.2 Horizonte AB (20 a 40 cm)	72
3.3 Horizonte Bt (40 a 60 cm)	76
4 – Avaliação da qualidade do Argissolo por meio da Ordenação Multidimensional (MNS) de atributos físicos e matéria orgânica ...	79
4.1 Horizonte A ou Ap (0 a 20 cm)	79
4.2 Horizonte AB (20 a 40 cm)	85
4.3 Horizonte Bt (40 a 60 cm)	91
CONCLUSÕES	96
BIBLIOGRAFIA	98

RESUMO

PACHECO, Edson Patto; **Estudo da compressibilidade e qualidade de um Argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas.**

No Nordeste brasileiro a cana-de-açúcar ocupa principalmente o ecossistema dos Tabuleiros Costeiros, onde a maioria dos solos é favorecida tanto pela topografia como também por possuir textura média e profundidade adequada. Porém, devido a grande quantidade de operações motomecanizadas a serem realizadas, esses solos são submetidos a pressões excessivas em condições de umidade que favorecem o processo de degradação física. O objetivo deste trabalho foi avaliar alterações do comportamento mecânico, na estrutura e na matéria orgânica de um Argissolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas, devido ao cultivo com cana-de-açúcar. Foram selecionadas cinco áreas de cana-de-açúcar com diferentes tempos de uso e tipos de cultivo: 4 anos cultivo de inverno (4anos I); 14 anos cultivo de inverno (14anos I); 14 anos cultivo de verão (14anos V); 30 anos cultivo de inverno (30anos I) e 30 anos cultivo de verão (30anos V). As áreas cultivadas foram comparadas entre si e com uma área de mata nativa (Mata), por meio da análise de regressão, análise de trilha e análise de ordenação multidimensional. Para avaliar o efeito dos tratamentos sobre os atributos físicos e a matéria orgânica do Argissolo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm de profundidade, representando os horizontes A ou Ap, AB e Bt, respectivamente. Os resultados permitiram concluir que a compactação do horizonte Ap não deve ser considerada fator limitante, tendo em vista que sua resistência mecânica à penetração é menor que a considerada como crítica para o desenvolvimento de raízes, mesmo quando o solo apresenta umidade referente ao ponto de murcha permanente. Portanto, o cultivo com cana-de-açúcar diminuiu a porosidade e aumentou a densidade do Argissolo estudado na profundidade de 0 a 20 cm, resultando em aumento do intervalo hídrico ótimo (IHO). O cultivo com cana-de-açúcar induziu a compactação dos horizontes subsuperficiais, havendo a redução da compressibilidade e aumento da resistência à penetração a níveis críticos ao desenvolvimento de raízes,

mesmo para umidades próximas ao da capacidade de campo, o que resultou na redução do IHO dos horizontes AB e Bt das áreas cultivadas. Nas três profundidades estudadas, o grau de compactação e a densidade do solo foram os atributos que apresentaram maior relação causa e efeito com a pressão pré-compactação e resistência à penetração do Argissolo estudado. A análise de ordenação multidimensional indicou uma queda na qualidade do Argissolo estudado, mesmo com poucos anos de cultivo com cana-de-açúcar, principalmente, para os horizontes Ap e AB. A diminuição da matéria orgânica particulada e estabilidade de agregados foram os principais indicadores da diminuição da qualidade do horizonte Ap, no entanto, para o horizonte AB a perda de qualidade foi atribuída à compactação do solo.

Palavras Chave: compactação do solo, pressão pré-compactação, resistência à penetração, atributos físicos, matéria orgânica do solo.

ABSTRACT

PACHECO, Edson Patto; **Compressibility and quality study of a yellow Argisol cultivated with sugarcane at Alagoas coastal tablelands.**

Brazilian northeast the sugarcane occupies mainly the coastal tablelands ecosystem, where most of the soils are favored by topography as well as for possessing medium texture and appropriate depth. However, due to great amount of mechanized operations to be accomplished, those soils are submitted to excessive pressures in conditions of moisture content that favor the process of physical degradation. The objective of this work was to evaluate alterations of the mechanical behavior, at the structure and the organic content of a cohesive yellow Argisol of Alagoas coastal tablelands, due to sugarcane cultivation. Five sugarcane areas were selected with different times of use and cultivation types: 4 years winter cultivation (4 years W); 14 years winter cultivation (14 years W); 14 years summer cultivation (14 years S); 30 years winter cultivation (30 years W) and 30 years summer cultivation (30 years S). The cultivated areas were compared amongst themselves and with a native forest area (Forest), through the regression analysis, path analysis and nonmetric multidimensional scaling analysis. To evaluate the treatment effects on the physical attributes and organic content of Argisol, deformed and non-deformed samples were collected at 0 to 20cm, 20 to 40cm and 40 to 60 cm depth, representing the horizons A or Ap, AB and Bt, respectively. The results allowed us to conclude that the Ap horizon compaction should not be considered as a limitant factor, considering that their soil penetration resistance is below to the considered as critic for the roots development, even when the soil presents permanent moisture content regarding the wilting point. Therefore, the sugarcane cultivation reduced the porosity and increased the Argisol density studied at 0 to 20 cm depth, resulting in increase of the limiting water screeches (LWS). The cultivation of sugarcane induced the compaction of the subsurface horizons, having the reduction of the compressibility and increase of the soil penetration resistance at critical levels to the roots development, even in close moisture content to the field capacity, what resulted in the reduction of LWS of the horizons AB and Bt of the cultivated areas. In the three studied depths, the compaction degree and the soil density were the attributes that presented

bigger relation cause-effect with the pre-consolidation pressure and soil penetration resistance of studied Argisol. The non-metric multidimensional scaling analysis indicated a reduction in the quality of studied Argisol, even with few years of cultivation with sugarcane, mainly, for the horizons Ap and AB. The decrease of the particulate organic content and aggregate stability was the main indicators of the decrease of the quality of horizon Ap, however, for AB horizon the quality loss was attributed to the soil compaction.

Key Words: soil compaction, pre-compaction pressure, penetration resistance, physical attributes, soil organic matter.

INTRODUÇÃO

Com a crise do petróleo e a valorização de novas fontes de energia, a cana-de-açúcar vem ganhando destaque para produção de álcool como fonte de energia renovável. O Brasil conta com uma posição privilegiada para atender às crescentes importações de álcool combustível por outros países, pois tem duas regiões produtoras com safras alternadas, podendo manter sua presença no mercado mundial ao longo de todo o ano.

A previsão de safra de 2009 para o Brasil foi de colher aproximadamente 686,6 milhões de tonelada de cana-de-açúcar, em uma área de 9,7 milhões de hectares, sendo que 13% das áreas plantadas estão no Nordeste, produzindo aproximadamente 71,7 milhões de toneladas (IBGE, 2009).

A região Nordeste, tradicional produtora de açúcar, vem perdendo posição relativa para a produção de São Paulo desde o lançamento do Proálcool em 1975. Melhores solos, áreas mecanizáveis, fortes investimentos em pesquisa e clima mais regular têm permitido a São Paulo uma produtividade muito superior à de Pernambuco e Alagoas, principais produtores de cana-de-açúcar nordestinos. Enquanto os produtores paulistas obtêm uma produtividade média de $85.380 \text{ kg ha}^{-1}$, a produtividade média no Nordeste é de $58.597 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo previstas médias de 63.500 e $54.639 \text{ kg ha}^{-1}$ em Alagoas e Pernambuco, respectivamente (IBGE, 2009).

No Nordeste a cana-de-açúcar ocupa principalmente o ecossistema dos tabuleiros costeiros, onde a maioria dos solos apresenta características favoráveis como topografia plana a suavemente ondulada, textura média e profundidade adequada. No entanto, estes solos frequentemente apresentam um horizonte coeso que é um horizonte pedogenético, adensado, muito duro ou extremamente duro quando seco e normalmente friável quando úmido (Jacomine, 2001). A redução da porosidade pelo adensamento natural diminui a capacidade de infiltração e o armazenamento de água, além de agir como impedimento físico ao desenvolvimento das raízes.

Nas áreas de cana-de-açúcar, esses aspectos pedogenéticos podem ser agravados pela grande quantidade de operações motomecanizadas que devem ser realizadas em curto espaço de tempo, o que submete esses solos a pressões excessivas em condições de umidade inadequadas, resultando em

compactações adicionais e consequente processo de degradação física do solo. Esta degradação, associada à irregularidade das chuvas e aos períodos de estiagem, podem diminuir a produtividade e longevidade das lavouras de cana-de-açúcar na região.

Normalmente, o preparo do solo para implantação de culturas perenes, semi-perenes e anuais é realizado com arado de aiveca ou de disco e grades pesadas que revolvem o solo de maneira superficial e intensa. No caso dos solos dos tabuleiros costeiros, essa prática pode transportar para a superfície material do horizonte coeso subjacente, com características físico-químicas indesejáveis para o desenvolvimento das plantas. Como alternativa, existem propostas para adoção do cultivo mínimo por meio da utilização de escarificadores e sistema plantio direto para o revolvimento mínimo do solo, bem como a utilização de subsoladores para destruição das camadas compactadas ou adensadas mais profundas.

Considerando a expressão geográfica dos solos coesos dos tabuleiros costeiros, com aproximadamente 10 milhões de hectares apenas no Nordeste brasileiro, e sua importância socioeconômica, por ser a base de sustentação agrícola dos Estados da costa oriental do Brasil, deve-se dispensar a devida atenção ao seu manejo e conservação.

Uma das formas de se estimar a qualidade de um solo é por meio da avaliação de sua estrutura, já que esta é fundamentalmente associada ao comportamento hidrológico do solo. Alguns atributos físicos como densidade, porosidade, capacidade de retenção de água, estabilidade de agregados em água, resistência à penetração e compressibilidade estão correlacionados com a condição da estrutural do solo. O conteúdo de matéria orgânica não é propriamente um indicador de qualidade relacionada à física do solo, mas influencia direta e indiretamente várias propriedades físicas que estabelecem a sua qualidade (Römken & Miller, 1971).

O comportamento compressivo de um solo, representado principalmente pela pressão de pré-compactação (σ_p), expressa o histórico de pressão que o solo já sofreu no passado, e também pode representar a capacidade de suporte de carga, ou seja, a pressão máxima que o solo suporta antes que ocorra compactação adicional. Portanto, esse atributo pode ser utilizado para diagnosticar práticas culturais mecanizadas que historicamente vêm causando

degradação física dos solos, bem como, servir aos processos de agricultura de precisão que visem o planejamento das operações motomecanizadas, a fim de reduzir o impacto das mesmas sobre a qualidade dos solos de tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar.

OBJETIVO GERAL

Avaliar alterações no comportamento mecânico, na estrutura e na matéria orgânica de um Argissolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas em função do tempo e tipo de cultivo com cana-de-açúcar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito do tempo e tipo de cultivo com cana-de-açúcar sobre a pressão de pré-compactação, resistência à penetração e alterações no intervalo hídrico ótimo (IHO) de um Argissolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas.

- Estudar o desdobramento dos efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e da matéria orgânica do solo sobre a pressão de pré-compactação e resistência à penetração de um Argissolo Amarelo Distrocoeso dos tabuleiros costeiros do Estado de Alagoas.

- Avaliar o efeito do tempo e tipo de cultivo com cana-de-açúcar sobre a qualidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso de tabuleiros costeiros, por meio da análise multivariada dos seus atributos físicos e matéria orgânica.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 - Compactação do Solo

Os solos são constituídos de quatro grandes componentes: substâncias minerais, matéria orgânica, água e ar. Solos considerados com ótimas condições para desenvolvimento vegetal devem conter metade de seu volume ocupado por sólidos (minerais e matéria orgânica) e metade por espaços porosos preenchidos equitativamente com água e ar (Brady, 1989; Ferreira, 1992). Esses quatro componentes não se encontram isolados uns dos outros. A matéria orgânica está misturada com a parte mineral, formando uma estrutura porosa. A parte líquida contida nos poros constitui a solução do solo, disponibilizando os minerais em forma de íons para as raízes das plantas, e o ar dos poros é indispensável para as trocas gasosas das raízes.

O manejo inadequado do solo pode modificar essa relação entre seus constituintes, podendo resultar na diminuição da porosidade, reduzindo a capacidade de infiltração e retenção de água e, conseqüentemente, redução da produtividade das plantas que encontram maior resistência à penetração de suas raízes. Um dos indicadores de qualidade do solo é a compactação, que pode ser definida com aumento da densidade do solo (D_s) provocada pelo rearranjo das partículas primárias (areia, silte e argila) e dos agregados, causado, principalmente, pelas operações de cultivo ou pela pressão de veículos e implementos de preparo do solo (Torres et al., 1993).

Segundo Gupta et al. (1989), o termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado que resulta no aumento da densidade em consequência da redução do seu volume devido à expulsão de ar dos poros do solo. Segundo os autores, quando o fenômeno de redução do volume ocorre com a expulsão de água dos poros do solo, esse fenômeno passa a se chamar adensamento. 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 e, também devido à destruição dos agregados, com conseqüente reorganização das partículas de argila, silte e areia, resultando em uma estrutura maciça e coesa na matriz do solo. Em uma microescala, a compactação do solo, devido à aplicação de pressões externas,

pode promover o rearranjo das partículas na matriz do solo, podendo resultar em modificação da forma e continuidade dos poros do solo. Marsili et al. (1998) verificaram que o tráfego de máquinas modificou a estrutura de um Cambissolo de textura média, passando de blocos subangulares para maciça, resultando no aumento da resistência a penetração, redução do volume de macroporos e modificação na forma dos poros, que passaram a apresentar formato alongado e paralelo à superfície, contribuindo para a redução da condutividade hidráulica.

Esses processos dependem da umidade do solo e das pressões externas a ele aplicadas durante o manejo (Horn et al., 1995). Segundo Bennie & Krynauw (1985), a compactação do solo depende de fatores internos e externos. Dentre os fatores internos está a composição mineralógica, textura, estrutura, umidade do solo e matéria orgânica; os fatores externos podem ser atribuídos principalmente à energia de compactação aplicada ao solo, que pode ser natural, pela ação do impacto das gotas de chuva, ou artificial por meio do pisoteio de animais ou de humanos e pelo uso de equipamentos agrícolas.

1.1 – Avaliação da Compactação do Solo

A densidade máxima obtida por uma compressão em um solo com uma dada energia é conhecida por compactabilidade (Bradford & Gupta, 1986). Segundo Gupta & Allmaras (1987), a facilidade que o solo não saturado decresce de volume, quando submetido a pressões externas, é chamada de compressibilidade, que depende de fatores internos e externos (Lebert & Horn, 1991). Estes autores consideram que fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da carga aplicada. Os internos correspondem ao histórico de tensão, umidade do solo, textura do solo, estrutura do solo, densidade inicial do solo e teor de carbono do solo, sendo que, para uma mesma condição é a umidade que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo (Dias Junior, 1994; Bigner & Wells, 1992; Etana et al., 1997, Braida et al., 2006). Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas sem que haja compactação significativa.

A susceptibilidade de um solo à compactação pode ser avaliada com ensaio de proctor normal ou suas variantes. Nesse tipo de ensaio para uma mesma energia de compactação, a densidade obtida depende da umidade do solo, ou seja, a densidade aumenta com o incremento da umidade até determinado valor, depois, torna-se decrescente. Assim, compactando o solo em várias umidades, mas sempre com a mesma energia, e relacionando-se os valores de densidade obtidos com a umidade de compactação, obtém-se a curva de compactação do solo, da qual se calculam a umidade crítica (UC) ou ótima para compactação e a densidade máxima (DM) correspondente (Caputo, 1980 e Braida et al., 2006). Nhantumbo & Cambule (2006) desenvolveram modelos de regressão, onde a umidade crítica é calculada em função dos teores de argila ou argila mais silte componentes da granulometria do solo.

Hillel (1980) propuseram um diagrama para representar a consistência, a resistência ao preparo, capacidade de suporte de carga e resistência à compressão do solo de acordo a sua umidade. Este diagrama indica que a melhor umidade para trabalhos mecanizados está no estado semi-sólido do solo, que encontra-se entre o limite de contração (LC) e o limite de plasticidade (LP), onde a consistência é friável, a resistência ao preparo é baixa, e a capacidade de suporte de carga e resistência a compressão são classificadas como alta a moderada. No entanto, apesar do diagrama apresentar uma classificação qualitativa da capacidade de suporte de carga dos solos, esta classificação não permite quantificar os níveis de pressões que podem ser aplicados aos solos conforme a sua umidade, o que pode levar a uma compactação indesejável mesmo na sua zona de friabilidade (Kondo & Dias Junior, 1999a). Portanto, uma alternativa para auxiliar no manejo considerando a umidade é a utilização de modelos matemáticos que quantifiquem a capacidade de suporte de carga ou pressão de pré-compactação do solo de acordo com a sua umidade, como os desenvolvidos por Dias Junior (1994) e Kondo & Dias Junior (1999a).

Acredita-se que o ensaio de proctor, por ser relativamente simples, também é limitado para o estudo da compactação de solos agrícolas, considerando a necessidade de destruir a sua estrutura para realização dos testes, o que apagaria a história das pressões exercidas sobre o solo pelas operações mecanizadas ou outras atividades antrópicas. Portanto, estudos

adicionais são necessários para que se possa validar o uso do ensaio de proctor normal para prever a compactação de solos agrícolas (Dias Junior, 2000).

2 – Compressibilidade e Compactação de Solos Agrícolas

A compressibilidade do solo pode ser determinada por meio do ensaio de compressão uniaxial (Dias Junior, 1994), também conhecido por ensaio de adensamento unidimensional (ABNT, 1990). O objetivo deste teste é determinar as propriedades de adensamento do solo por meio da velocidade e magnitude das deformações quando o solo é lateralmente confinado e axialmente carregado e drenado (ABNT, 1990).

O ensaio de compressão uniaxial basicamente consiste em aplicar sucessiva e continuamente pressões crescentes e preestabelecidas a uma amostra de solo na condição parcialmente saturada (Dias Junior, 1994; Dias Junior, 2000; ABNT, 1990). Este ensaio permite obter a curva de compressão do solo, que é representada por um gráfico no qual se plotam, no eixo das abscissas, os valores das pressões aplicadas (σ) em escala logarítmica e, no eixo das ordenadas, os valores do índice de vazios (ε) em escala natural (Figura 1). A partir desta curva é possível determinar a tensão de preconsolidação (σ_p), o índice de compressão (IC) e o índice de recompressão (CR).

A σ_p pode ser obtida a partir da curva de compressão pelo método de Casagrande ou pelo método de Pacheco e Silva (ABNT, 1990). O IC é a relação entre a variação do índice de vazios e a variação do log da σ , em qualquer parte da linha de compressão virgem, representando sua inclinação: $IC = -(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/\log(\sigma_2/\sigma_1)$, em que σ_2 e σ_1 correspondem a um intervalo de pressões aplicada em qualquer parte do seguimento da reta virgem. O CR é a razão entre a variação do índice de vazios da linha de compressão secundária e o log da σ_p , representando a inclinação da linha de compressão secundária: $CR = -(\varepsilon_{op} - \varepsilon_i)/\log(\sigma_p)$ (Reinert et al., 2003).

O método de Casagrande consiste em determinar o ponto de mínimo raio de curvatura (Figura 2) (obtido pelo método de quadrados mínimos), e por

ele traçar uma paralela ao eixo das abscissas (2 da Figura 1) e uma tangente à curva de compressão (1 da Figura 1). Posteriormente deve-se traçar a bissetriz (3 da Figura 1) do ângulo formado por essas duas retas. A abscissa determinada pela reta vertical (5 da Figura 1) que vai do ponto de interseção da bissetriz com o prolongamento da linha de compressão virgem (4 da Figura 1), corresponde a pressão de pré-compactação ($\sigma = \sigma_p$) (Figura 1).

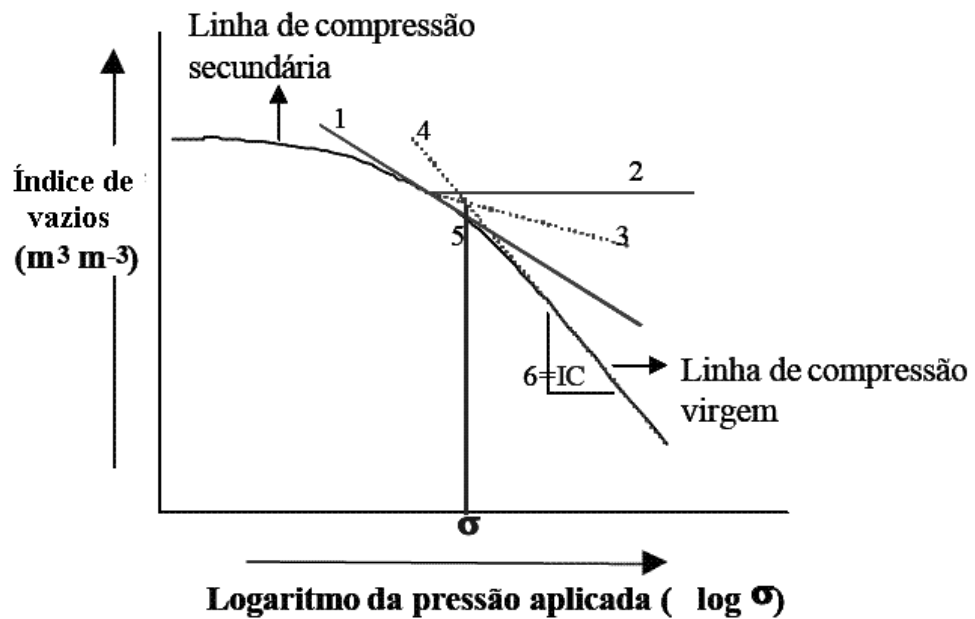


Figura 1. Curva de compressão do solo (Imhoff et al., 2001).

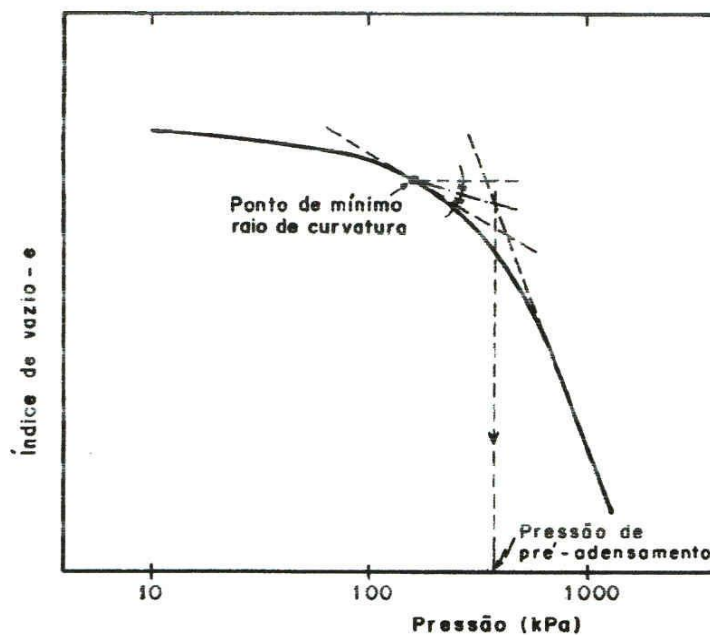


Figura 2. Determinação da σ_p pelo método de Casagrande (ABNT, 1990).

O método de Pacheco e Silva consiste nos seguintes passos: traçar uma reta horizontal, passando pela ordenada correspondente ao índice de vazios inicial (ε_i) (Figura 3). Pelo ponto de interseção com o prolongamento da reta virgem, traçar uma reta vertical até a curva de compressão. Por esse ponto, traçar uma reta horizontal até o segundo ponto de interseção com o prolongamento da reta virgem. A abscissa desse ponto define a pressão de pré-adensamento ou pressão de pré-compactação (Figura 3).

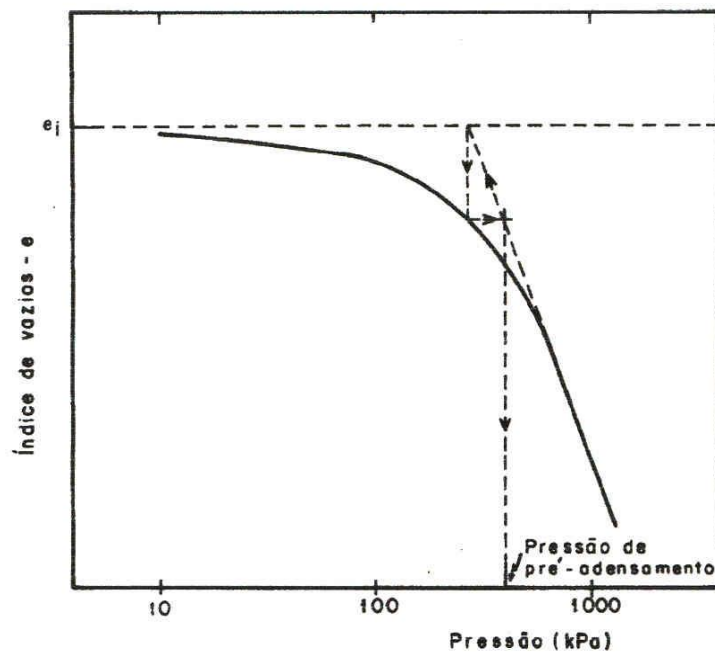


Figura 3. Determinação da σ_p pelo método de Pacheco e Silva (ABNT, 1990).

Reinert et al. (2003) desenvolveram o programa computacional COMPRESS (software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros), com o objetivo de usar dados laboratoriais de ensaios de compressibilidade para: calcular as relações básicas no início e final dos testes; ajustar a equação $\varepsilon = \varepsilon_i / (1 + \alpha \sigma^n)^m$ aos dados, para plotar a curva de compressão na tela do computador; calcular a pressão pré-compactação, o índice de compressão e recompressão pelo método de Casagrande ou pelo método de Pacheco e Silva (ABNT, 1990), bem como criar banco de dados com todos os dados e valores calculados. Segundo os autores, o software de domínio público foi criado com objetivo didático, mas pode ser usado em rotinas de laboratórios.

Após a realização do ensaio de compressão uniaxial, em amostras de solo com diferentes umidades, pode-se gerar um modelo de curva de pressão de pré-compactação em função da umidade. Essa curva indica se os níveis de pressão aplicados irão gerar compactação adicional ou não (Dias Junior, 2000).

Quando o solo ainda não sofreu pressão prévia, a relação entre as pressões aplicadas pelo ensaio uniaxial e a densidade do solo é linear, sendo que, a aplicação de qualquer pressão resultará em deformações não recuperáveis (Gupta & Allmaras, 1987; Lebert & Horn, 1991), resultando em compactações adicionais (Dias Junior, 1994). Quando o solo já experimentou pressões prévias e/ou ciclos de umedecimento e secagem, o mesmo adquire um estado de compacidade mais elevado, em que a compactação adicional poderá ou não ocorrer com novas aplicações de carga (Gupta et al., 1989; Lebert & Horn, 1991; Dias Junior, 1994). Portanto, um aumento da densidade do solo em consequência de uma redução de seu volume pode ou não causar compactação adicional. Por isso, pesquisadores têm encontrado efeitos benéficos ou adversos da compactação do solo (Dias Junior, 2000). Um dos efeitos benéficos pode ser atribuído ao aumento de disponibilidade de água em anos mais secos (Camargo, 1983). No entanto, a compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (Bicki & Siemens, 1991), resultando no decréscimo da produtividade, aumento da erosão e da energia necessária para o preparo do solo (Soane, 1990).

É possível que os efeitos benéficos sejam causados pela aplicação de pressões menores do que a maior pressão à qual o solo esteve submetido no passado, enquanto efeitos adversos talvez sejam provocados pela aplicação de pressões maiores do que a maior pressão sofrida no passado. Portanto, para se ter uma agricultura sustentável, é importante conhecer os níveis de pressão suportados pelo solo no passado, bem como, a umidade do solo no momento das operações agrícolas, para que a compactação adicional seja evitada (Dias Junior, 2000).

A compactação presente na camada arável tende a ser amenizada pelo preparo do solo nos cultivos sucessivos. No entanto, a compactação permanece, em forma de um aumento da densidade dos agregados, refletindo

estes a densidade da camada compactada destruída pelo preparo. Já a compactação dos horizontes subsuperficiais tende a ser aliviada por meio da subsolagem. No entanto, esta compactação tende a ser de caráter permanente em virtude das peculiaridades da subsolagem. Assim, é possível que a estimativa dos níveis de pressão a serem aplicados ao solo, pelo uso da modelagem matemática, seja viável para minimizar os problemas da compactação do solo (Dias Junior, 2000).

A questão crítica em relação à susceptibilidade do solo à compactação reside em definir quando o solo está com umidade adequada para se executarem as operações mecanizadas, bem como estimar quanto de deformação ocorrerá nele quando as pressões aplicadas excederem sua capacidade de suporte de carga. Portanto, a umidade adequada indicará a máxima pressão que o solo pode suportar, sem que a compactação adicional ocorra, caso contrário, ele será considerado muito úmido (Dias Junior, 2000).

Quando o solo já experimentou pressões prévias ou ciclos de secagem e umedecimento, a variação das pressões atuantes sobre o solo determinará a formação de duas regiões distintas na curva de compressão do solo: 1) Curva de compressão secundária e 2) Reta de compressão virgem (Gupta et al., 1989; Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996). A curva de compressão secundária representa os níveis de pressões sofridas pelo solo no passado, enquanto a reta de compressão virgem representa as primeiras pressões aplicadas ao solo, que resultaram em compactações adicionais. É na região da curva de compressão secundária, que o solo deve ser cultivado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional. É este componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo que foi usada na modelagem da capacidade de suporte de carga por Dias Junior (1994), Dias Junior & Pierce (1996), Kondo & Dias Junior (1999a) e Silva et al. (1999).

A pressão de pré-compactação, usada para indicar o ponto de separação entre ambos os casos (Dias Junior & Pierce, 1996), divide a curva de compressão do solo em duas regiões: região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária) e região de deformações plásticas e não recuperáveis (reta de compressão virgem). Segundo Gupta et al. (1989) e Lebert & Horn (1991), em solos agrícolas, devem ser evitadas pressões maiores do que a maior pressão aplicada

anteriormente, para que não ocorram compactações adicionais. Considerando essa proposição, a pressão de pré-compactação deve ser a máxima pressão aplicada ao solo para evitar compactação adicional (Dias Junior, 2000). Portanto, a pressão de pré-compactação corresponde à capacidade de suporte de carga de solos parcialmente saturados, o que torna importante o entendimento do comportamento da curva de compressão em diferentes sistemas de manejo, pois ela permite avaliar a susceptibilidade do solo à deformação e, conseqüentemente, à compactação (Kondo & Dias Junior, 1999b).

A determinação da pressão de pré-compactação, que é obtida em laboratório por meio do ensaio de compressão uniaxial, requer aparelhos sofisticados. Além do tempo gasto na realização do ensaio, há necessidade de usar um método gráfico ou de planilhas para a sua determinação. Uma maneira alternativa que visa minimizar este problema seria a calibração da pressão de pré-compactação com outras medidas de fácil e rápida obtenção (Dias Junior et al., 2004). Segundo os autores, por meio de equações, as pressões de pré-compactação podem ser estimadas em função da resistência do solo à penetração, que pode ser utilizada na identificação da compactação do solo e como ferramenta para auxiliar na decisão sobre a realização ou não de determinada operação mecanizada.

A importância do conhecimento da pressão de pré-compactação é reconhecida por auxiliar na implementação de sistemas conservacionistas de manejo e por estar relacionada com a resistência do solo à penetração das raízes (Römken & Miller, 1971). De acordo com esses autores, a pressão de pré-compactação é uma estimativa da resistência do solo na qual o alongamento das raízes cessa, indicando que solos com valores elevados de pressão de pré-compactação apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes. Culley & Larson (1987) encontraram relação linear entre a resistência do solo à penetração e a pressão de pré-compactação. Alguns autores têm mencionado que existe uma relação entre a resistência à penetração e pressão pré-compactação de 10:1 (Canarache et al., 2000). Levando em consideração que a pressão de pré-compactação, assim como a resistência do solo à penetração, são função da umidade, Lima et al. (2006), estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo, concluíram que existe uma

relação significativa, positiva e linear entre a pressão de pré-compactação e a resistência do solo à penetração medida no laboratório e no campo, comprovando que a capacidade de suporte de carga pode ser estimada a partir da resistência à penetração.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) incorpora em um único dado a amplitude da umidade do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Estas inter-relações dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de degradação da estrutura a que o solo está submetido. Portanto, o IHO pode ser utilizado como indicador da qualidade e condição estrutural do solo (Tormena et al., 1998). O cálculo do IHO leva em consideração da umidade em que a resistência a penetração é maior ou igual a 2000 kPa, que é considerado como nível crítico para o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das culturas. Segundo os autores, essa umidade é obtida por meio de modelos matemáticos de resistência do solo à penetração em função da umidade do solo.

3 – Fatores Determinantes da Compressibilidade do Solo

Segundo Caputo (1980), quando uma massa de solo não saturada é submetida à aplicação de um carregamento superficial, em seu interior resultam pressões que atuam em suas fases sólida, líquida e gasosa. A compressão e a deformação do solo em resposta à aplicação da carga normal ocorrem quando a pressão efetiva imposta supera a resistência ao cisalhamento nos pontos de contato entre as partículas, provocando sua ruptura. A resistência ao cisalhamento é o somatório do atrito existente entre as partículas e das forças coesivas existentes entre elas, portanto, para conhecermos a resistência ao cisalhamento de um solo, devemos compreender seus componentes, ou seja, a coesão e o ângulo de atrito interno do mesmo.

No caso dos solos, o ângulo de atrito interno é determinado pela dureza, forma, tamanho, rugosidade superficial e grau de empacotamento de suas partículas. De maneira geral, solos arenosos apresentam ângulo de atrito interno superior aos solos argilosos. No entanto, quando solos argilosos

formam agregados é possível que, se as cargas normais empregadas são menores que a resistência desses agregados, o ângulo de atrito interno seja tão elevado quanto o de solos arenosos, pois nesse caso ele se refere ao atrito entre os agregados que possuem forma, rugosidade e tamanho semelhante aos grãos de areia. Quando se aplicam tensões normais mais elevadas que a resistência dos agregados, esses se rompem e o ângulo de atrito interno passa a ser determinado pelas características das partículas primárias do solo, sendo geralmente menor do que aqueles determinados pelos agregados (Lebert & Horn, 1991).

A fração argila do solo é constituída principalmente por uma mistura, em proporções variáveis, de argilominerais (1:1, 2:1 etc) e óxidos. Os óxidos de ferro e alumínio são os principais cimentantes inorgânicos, cujo efeito irreversível ou muito lentamente reversível ajuda a formar os agregados estáveis sob a ação de água, sendo esse efeito notável nos Latossolos (Meurer, 2006).

Segundo Rocha et al. (2002), solos em estado mais jovem de desenvolvimento (Cambissolos, por exemplo), que apresentam maiores valores nas relações K_i ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) e K_r ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) e maiores teores silte, podem apresentar menor grau de estruturação, com conseqüente redução do contato entre as partículas, favorecendo à menores forças de atrito interno e resistência ao cisalhamento.

Lima et al. (2004) estudando a heterogeneidade da compactação de um Latossolo sob pomar de laranja, verificaram que diferenças na intensidade do tráfego de máquinas agrícolas não exerceram influência significativa sobre o índice de compressibilidade (IC), confirmando o fato de que o IC é um indicador principalmente relacionado com as propriedades intrínsecas do solo, como foi assinalado por Larson et al. (1980). Por outro lado, os autores verificaram que a pressão de pré-compactação relacionou-se significativamente com a posição de amostragem, demonstrando a influência das diferenças na intensidade do tráfego de máquinas agrícolas sobre as condições físicas do solo, ou seja, a pressão pré-compactação é influenciada pelo tipo de manejo.

No entanto, Silva et al. (1999), avaliando a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro (oxidico) e um Cambissolo (caulinítico) com base na pressão de pré-compactação, verificaram que o primeiro apresentou maior

suscetibilidade à compactação para todas as condições avaliadas. Segundo os autores, esse comportamento está relacionado aos tipos de arranjo das partículas nos dois solos, sendo que, a estrutura granular do Latossolo confere um maior número de espaços porosos e, conseqüentemente, maior possibilidade de ajustes por ocasião do tráfego de máquinas. Já o Cambissolo, cuja estrutura é em blocos e, portanto mais adensada (Resende et al., 2002) lhe confere uma maior resistência à compactação.

Segundo Rocha et al. (2002), um Argissolo com alta relação K_i e com horizonte B textural, por dispor de uma estrutura em blocos, de forma geral, pode apresentar maior contato entre as partículas, o que lhe confere maior resistência ao cisalhamento. Sendo assim, para os Argissolos parece que a textura é mais importante que a estrutura, tendo em vista que, normalmente, a mesma é fraca para esse tipo de solo.

Dias Junior et al. (2002) estudando a pressão de pré-compactação em função da umidade em camadas superficiais de Argissolos (5,0 a 10,0 cm), verificaram diferença estatisticamente significativa entre as equações de regressão para dois Argissolos com texturas diferentes. O Argissolo Amarelo com textura arenosa/média (argila = 50 g kg⁻¹) apresentou valores de σ_p maiores do que o Argissolo Amarelo com textura média/argilosa (argila = 242 g kg⁻¹) umidades maiores do que 0,09 kg kg⁻¹. Assim, espera-se que a camada superficial do Argissolo Amarelo textura arenosa/média suporte maiores pressões do que a do Argissolo Amarelo textura média/argilosa, devido ao seu maior teor de areia.

Segundo Lebert & Horn (1991) o ângulo de atrito interno é dependente, ainda, da densidade e do teor de água do solo. A densidade afeta o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, ou seja, o número de pontos de contato entre as mesmas, sendo que para um mesmo material o atrito é tanto maior quanto maior for a densidade. A água também afeta o ângulo de atrito interno por constituir-se em um agente lubrificante entre as partículas sólidas. A adição de água ao solo resulta na formação de filmes de moléculas de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas.

De maneira geral, observa-se que a pressão de pré-compactação se torna maior à medida que o solo se torna mais seco. Isso acontece porque a

água atua de duas formas sobre a resistência do solo: a) diminui a coesão entre as partículas sólidas e b) forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre as mesmas (Hillel, 1980). O resultado é uma redução da pressão de pré-compactação, como descrito por Dias Junior (1994), Kondo & Dias Junior (1999) e Silva et al. (2002), que observaram um decréscimo exponencial da pressão de pré-compactação com o aumento do teor de água do solo.

A matéria orgânica também é muito importante e pode interferir na resistência do solo à compactação através dos seguintes efeitos: a) aumento da força de ligação entre partículas minerais, em função de sua natureza coloidal e comportamento molecular; b) aumento da elasticidade do solo, uma vez que materiais orgânicos podem apresentar altos índices de relaxação quando uma carga aplicada sobre eles é retirada e, quando adicionados ao solo, transmitem a ele essa propriedade; c) diluição da densidade, já que a densidade dos materiais orgânicos é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo, logo a adição desses materiais ao solo resulta em uma mistura de menor densidade; d) filamentos, como hifas de fungos e raízes, entrelaçam partículas do solo, mantendo-as juntas; e) algumas substâncias orgânicas, ao recobrir partículas de argila, podem mudar sua carga elétrica e facilitar o fluxo de água entre elas; f) substâncias orgânicas, ao reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (Soane, 1990).

A matéria orgânica tem efeito determinante na formação e estabilização de agregados no solo. Segundo Horn et al. (1993), a resistência do solo tende a aumentar com o desenvolvimento de estrutura. Entretanto, D'Agostini (1992) argumenta que solos recuperados por processos biológicos, em que as condições estruturais se aproximam das naturais, tendem a apresentar condições de elevada compressibilidade, uma vez que a agregação é acompanhada de um aumento da porosidade, em especial da macroporosidade. Um solo que apresenta macroporosidade elevada é mais compressível, porque apresenta menor número de pontos de contato entre partículas sólidas para conferir resistência mecânica à pressão compressiva imposta a ele. Portanto, a matéria orgânica apresenta efeitos contraditórios sobre a resistência do solo à compactação: a) aumento da força de ligação

entre as partículas minerais e b) mudança no arranjo das partículas (porosidade) (Horn & Lebert, 1994). O balanço entre esses dois efeitos, que, por sua vez, depende da origem e estado de decomposição da matéria orgânica, irá determinar o efeito sobre a resistência do solo. De fato, a matéria orgânica pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang et al., 1997). Quando predominam os efeitos de redução da densidade, por aumento da porosidade, a resistência à compressão diminui. Entretanto, a matéria orgânica produz aumento na resistência do solo à compressão, quando predomina o efeito de aumento dos parâmetros de cisalhamento, aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente e redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas, redução da densidade por efeito de diluição e aumento da elasticidade.

Quanto maior o teor de matéria orgânica, maior terá que ser o teor de água para que a mesma atue efetivamente na redução da coesão e do atrito entre as partículas minerais, resultando em maiores pressões de pré-compactação para solos mais ricos em matéria orgânica, para uma mesma umidade. O teor de matéria orgânica ainda tem uma interação com a granulometria do solo, sendo que, em solo arenoso o efeito da matéria orgânica em reduzir a atuação da água como lubrificante entre as partículas minerais é muito maior do que no argiloso (Braida, 2004). A matéria orgânica possui uma área superficial específica variando entre 800 a 900 m² g⁻¹ (Meurer, 2006) e uma CTC que pode chegar a 1400 cmol_c kg⁻¹ (Canellas et al., 1999), com uma capacidade de retenção de água muito maior do que a da areia, cuja área superficial específica é menor que 0,10 m² g⁻¹ e a CTC é nula. Assim, na repartição da água adicionada ao solo, a matéria orgânica acaba competindo por uma quantidade muito maior que aquela que a areia retém e, conseqüentemente a água adicionada fica concentrada próximo das partículas orgânicas, dificultando a formação de películas de água sobre a superfície dos grãos de areia.

4 – Uso e Manejo dos Solos de Tabuleiros Costeiros

Os solos de tabuleiros estão distribuídos em quase toda a faixa costeira do Brasil, desde o Estado do Amapá até o Rio de Janeiro, com extensão até o vale do rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo. O termo “tabuleiros costeiros” é usado para designar uma forma de superfície tabular, dissecada por vales profundos e encostas com forte declividade. Algumas áreas possuem relevo suavemente ondulado, enquanto outras, onde houve forte dissecamento, a topografia chega a ser ondulada até fortemente ondulada, com elevações de topos planos (chãs) (Jacomine, 2001). Os solos predominantes nos tabuleiros costeiros, Argissolos e Latossolos Amarelos, que são pobres em matéria orgânica e nutrientes, têm baixa CTC, baixa saturação por bases e aumento de acidez em profundidade. Embora os solos sejam considerados profundos, a presença de camadas coesas, normalmente, reduz sua profundidade efetiva (Souza, 1996).

No caso particular dos solos de tabuleiros costeiros, o termo coeso com significado de tenaz, tem sido usado inclusive para destacar compacidade natural (adensamento) de horizontes subsuperficiais associada a diferentes graus de coesão. Nos Latossolos e Argissolos Amarelos sob floresta primária, esses horizontes situam-se a profundidades variáveis, normalmente coincidindo com os horizontes AB e/ou BA. Entretanto, em solos cultivados podem aparecer próximo à superfície, após os primeiros 10 a 20 cm, em decorrência da erosão (Rezende et al., 2002). A camada coesa dos solos de tabuleiros costeiros é definida por Araújo Filho et al. (1999) como uma zona do perfil com densidade maior que outras camadas, e ocorre geralmente entre 20 e 80 cm de profundidade, tem consistência dura a extremamente dura, quando seca, e friável quando úmida. Portanto, os autores salientam que a umidade desses solos é um fator muito importante.

O conceito de consistência do solo compreende as manifestações das forças físicas de adesão e coesão que agem dentro do solo, sendo que, em diferentes umidades a adesão refere à atração da fase líquida sobre a superfície sólida. A coesão é a união entre partículas de natureza igual (sólido com sólido, ou líquido com líquido) devido a forças de atração mútua que surgem de mecanismos físico-químicos, tais como: força de Van der Waals,

que é inversamente proporcional ao cubo da distância entre as partículas (forças fracas); atração eletrostática entre superfícies de argila de cargas contrárias; união de partículas entre si mediante pontes catiônicas; efeito cimentante da matéria orgânica, óxidos e carbonatos de alumínio e ferro e outras substâncias; tensão superficial dos meniscos nas interfaces ar-água que sempre existe em argilas não saturadas (Baver et al., 1972). Devido a ação dessas forças mútuas, “todos os solos minerais, independente da textura ou natureza dos minerais presentes, quando secos, apresentam-se coesos, revelando a consistência dura, muito dura ou, em certos casos, extremamente dura” (Demattê, 2001). Quando úmidos ou molhados essas características tendem a desaparecer, dando lugar às formas de consistência friável, plástica, pegajosa ou fluida, conforme o caso. Uma amostra de um horizonte coeso, quando seca, desmancha-se ao ser imersa em água e, quando úmida, deforma-se lateralmente ao ser pressionada. Este aspecto é que diferencia o coeso do fragipã, que ao invés de passar por uma lenta deformação, rompe-se subitamente em fragmentos menores, quando comprimido. O horizonte coeso normalmente encontra-se abaixo do horizonte A, podendo ser localizado na superfície devido à erosão ocorrida na camada que esteve acima dele. Normalmente é encontrado entre 30 e 60 cm de profundidade, podendo, no entanto, atingir até 1 metro ou pouco mais, sobretudo nos solos com horizonte B textural (Argissolos ou Podzólicos). Quanto mais argiloso o solo, maior a expressão das forças de coesão e adesão. Para solos com o mesmo teor de argila, quanto mais novo ele for, isto é, quanto menos intemperizado e mais rico em argilas mais ativas, maior será a expressão dessas forças. Também é comum a ocorrência de solos arenosos bastante endurecidos quando secos. A proporção de areias de vários tamanhos, combinado com baixos teores de argila e silte que esses solos apresentam, induz a um empacotamento dessas frações, formando camadas muito duras (Jacomine, 2001).

A origem dos solos coesos ainda é assunto polêmico, podendo estar relacionada a vários processos simultâneos. Porém, seja qual for a causa dessa coesão, seu efeito prejudica o espaço poroso do solo e, conseqüentemente, a dinâmica de ar, água, nutrientes, temperatura, microorganismos e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, com reflexos negativos na produção agrícola. De fato, as espécies vegetais cultivadas nos solos coesos dos tabuleiros costeiros, algumas vezes com

irrigação suplementar, geralmente apresentam baixo vigor, reduzida longevidade e baixa produtividade, comparativamente aos mesmos cultivos realizados em outras unidades de paisagem (Rezende et al., 2002).

A importância social e econômica dos tabuleiros costeiros é justificada pelas grandes concentrações urbanas, pela diversidade de exploração agrícola com grande potencial para produção de alimentos, pela infra-estrutura de transporte rodoviário e terminais marítimos para escoamento da produção e por abrigar grande parte da mata atlântica ainda existente no país (Cintra et al., 1997).

Os tabuleiros são cultivados principalmente com cana-de-açúcar desde o litoral do Nordeste até a região de Campos e Macaé, no Estado do Rio de Janeiro (Jacomine, 2001). O cultivo da cana-de-açúcar ocupa uma área de 1,14 milhões de hectares somente no Nordeste, com maior concentração nos Estados de Alagoas e Pernambuco. A fruticultura tropical também está sendo praticada em todas as áreas dos tabuleiros costeiros. Outras culturas como mandioca, batata doce, inhame e feijão caupí, são frequentes nesses solos (Jacomine, 2001).

A ocupação dos solos dos tabuleiros costeiros, semelhantemente ao que aconteceu na maioria das áreas agrícolas, ocorreu sem o devido respaldo da pesquisa, a qual, em muitos casos, tem estado a reboque das iniciativas e ações dos produtores interessados no rendimento econômico de suas terras. Um exemplo disso é a mecanização agrícola voltada para o preparo do solo, que tem sido relegada a plano secundário no ecossistema de tabuleiros. Por meio de “pacotes tecnológicos”, observam-se recomendações tradicionais de manejo, particularmente quanto ao preparo dos solos praticado geralmente com máquinas e implementos agrícolas mal dimensionados e/ou mal regulados (Rezende, 2000).

Com raras exceções, o preparo dos solos de tabuleiros costeiros tem sido feito com arados de aiveca e de disco ou com grade aradora. O revolvimento do solo feito dessa maneira, de forma sistemática e intensa, além de proporcionar corte raso, geralmente transporta para a superfície material do horizonte coeso subjacente, geralmente mais argiloso, plástico e pegajoso, ácido, pobre em nutrientes, com baixa CTC, pouca agregação e rico em argila dispersa em água. Sob a ação da chuva, do sol e do trânsito intenso de

máquinas e implementos agrícolas, o leito de semeadura e raízes assim formado degrada-se continuamente, prejudicando cada vez mais a produção agrícola. Outro fator negativo da inversão da leiva é a alteração da vida microbiana do solo: microorganismos que vivem em condição aeróbica são enterrados, enquanto os de meio anaeróbico são expostos à superfície, resultando na morte dos mesmos com prejuízo inclusive, na decomposição da matéria orgânica (Rezende, 2000). Um outro problema encontrado, a respeito da conservação da matéria orgânica, é o sistema de colheita da cana queimada. Além do cultivo intenso da cana-de-açúcar utilizando preparo excessivo do solo e elevado tráfego de máquinas, Nascimento (2001), aponta a queima da palhada antecedendo a colheita como um dos fatores causadores da degradação dos solos de tabuleiros costeiros e da redução da produtividade da cultura.

Como exemplo, na Usina de Santa Clotilde e na Caetés localizadas no Estado de Alagoas, as práticas de manejo adotadas incluem, a cada quatro anos, antes do novo plantio, duas gradagens semi-pesadas, duas intermediárias e duas de acabamento, e posterior operação de cultivo com uma ou duas capinas (Silva & Ribeiro, 1995; Silva, 1996). Os mesmos autores caracterizando Latossolos Amarelos de tabuleiros sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas, concluíram que a morfologia, micromorfologia e as análises físicas mostraram evidências de que além do desenvolvimento inicial de compactação dos horizontes Ap e AB, ocorre no horizonte BA, um adensamento pedogenético natural do solo o qual foi acelerado com o cultivo da cana-de-açúcar, pelo preenchimento de poros com argila iluvial.

A média da densidade de camadas coesas situa-se entre 1,5 a 1,8 Mg m⁻³, enquanto nos horizontes superficiais, em condição natural, varia de 1,2 a 1,4 Mg m⁻³. Entretanto, especialmente na zona canavieira, a densidade média dos horizontes superficiais é muito afetada pelo manejo do solo, elevando-se para uma faixa de 1,3 a 1,8 Mg m⁻³. Nessas condições, os horizontes superficiais tornam-se compactados ou adensados. Além da compactação (causada pelo uso e manejo) e da coesão (de natureza genética), alguns solos, como os Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos, podem apresentar horizontes superficiais cimentados, do tipo fragipã (cimentação fraca) ou duripã (cimentação forte). Estes horizontes criam

impedimentos físicos, muito mais intensos que a coesão e normalmente restringem a drenagem interna dos solos (Araújo Filho et al., 2001). Em estudos sobre o efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar sobre propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico no Estado de Alagoas, Maia & Ribeiro (2004) verificaram que houve um aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade e porosidade total nos perfis cultivados.

Tentando definir, com maior clareza, parâmetros físicos que melhor caracterizem o horizonte coeso e a sua localização no perfil, Santana (2003) testou algumas variáveis físicas: resistência do solo à penetração, macroporosidade e densidade do solo, que pudessem detectar a ocorrência do horizonte coeso. Dentre as variáveis testadas, a resistência à penetração apresentou o melhor comportamento, tendo, como limitação, a necessidade de sua avaliação em ampla faixa de umidade do solo. A macroporosidade também se revelou um atributo bastante adequado para avaliar a coesão, considerando a sua correlação positiva com a condutividade hidráulica saturada. Giarola et al. (2003), estudando solos coesos do Estado da Bahia, concluíram que as medidas de resistência tênsil, resistência do solo à penetração e densidade do solo foram os principais fatores que influenciaram, direta ou indiretamente, as propriedades físicas analisadas, sendo estas responsáveis pelas diferenças entre horizontes coesos e não-coesos.

O cultivo do solo acarreta modificações nos atributos físicos, dependendo da intensidade de preparo do solo. As principais alterações são evidenciadas pela diminuição do volume de macroporos, tamanho de agregados e taxa de infiltração de água no solo, bem como, pelo aumento da resistência à penetração de raízes e densidade do solo (Cavenage et al., 1999). Um solo ideal para produção agrícola deve apresentar $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total, sendo $1/3$ macroporos e $2/3$ microporos (Kiehl, 1979).

Segundo Baver et al. (1972), o valor mínimo de macroporos deve ser de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para promover o desenvolvimento satisfatório do sistema radicular. Silva & Ribeiro (1997), estudando o efeito de vários anos de cultivo de cana-de-açúcar sobre um Latossolo Amarelo no Estado de Alagoas, verificaram que, nas áreas com maior tempo de cultivo a porosidade era menor, destacando-se a menor macroporosidade, sendo que, esta última representa os espaços entre os agregados mais afetados pelo manejo. Segundo Paulino et al. (2004), esta

situação indica que a escarificação do solo com o tríplice cultivo se faz necessária, tanto para reduzir a densidade do solo e a microporosidade, quanto para aumentar a macroporosidade. No entanto, os autores não observaram efeito significativo da escarificação de soqueiras, sobre a área e comprimento totais de raízes, bem como, sobre a produtividade de cana-de-açúcar cultivada em Latossolo Vermelho distroférico no Paraná, divergindo dos resultados encontrados por Duruoha et al. (2001), que concluíram que a compactação do solo reduz o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar.

Uma das alternativas utilizadas para aumentar a profundidade efetiva dos solos dos tabuleiros com horizontes coesos tem sido o uso de práticas mecânicas (subsolagem), práticas biológicas (leguminosas e/ou adubação orgânica) ou a associação das duas práticas que, em geral, tem se mostrado mais efetiva (Cintra et al., 2006). Investigando o efeito da adubação verde e orgânica sobre a distribuição de raízes de cana-de-açúcar no perfil de um Argissolo Amarelo distrófico, em ambiente de Tabuleiros Costeiros, os autores concluíram que a utilização de adubação verde com *Crotalaria spectabilis* durante a renovação do canavial contribui para o aprofundamento do sistema radicular da cana-de-açúcar, atuando na melhoria do ambiente radicular em profundidade e, que a melhoria do ambiente radicular criado pela adubação orgânica fica restrito apenas à camada superior do solo (primeiros 30 cm). O aprofundamento das raízes da cana-de-açúcar deve ter como efeitos positivos, a redução da vulnerabilidade dessa cultura a estresses de umidade e a melhoria na sua capacidade de explorar um maior volume de solo em água e nutrientes. Essas pressuposições estão de acordo com as observações de Calegari et al. (1993), quando afirmam que os benefícios da prática de adubação verde não se restringem apenas à melhoria do balanço de nitrogênio no solo, mas também, ao aprofundamento de suas raízes que, ao se decomporem, favorecem as culturas subsequentes permitindo a extensão dos seus sistemas radiculares pelos canais produzidos.

Santos (1992) concluiu que a subsolagem em solos coesos dos tabuleiros costeiros da Bahia promoveu aumento da argila dispersa no sulco da subsolagem, redução da resistência do solo à penetração, redução da densidade do solo, aumento da macroporosidade e aumento da condutividade hidráulica saturada e infiltração de água do solo.

Efeitos favoráveis da subsolagem nesse ecossistema também foram citados por Nacif (1994) que observou aumento da porosidade total e macroporosidade, menor compactação e melhor armazenamento de água no solo. Resultados convergentes ocorreram na China, onde Xu & Mermoud (2001) observaram que a subsolagem causou importante redução na densidade do solo nos primeiros 40 cm do perfil do solo, aumento significativo do volume de macroporos e decréscimo no volume de microporos, promovendo melhoria na condutividade hidráulica do solo.

Em abordagem sobre os sistemas de manejo de mobilização mínima do solo comparado ao manejo convencional, Calegari & Medeiros (2001) mencionam que a tendência de aumento de produtividade ao longo dos anos, bem como de estabilidade dos rendimentos, no caso de culturas anuais, deve-se à melhoria que o manejo não convencional promove sobre as características físicas, químicas e biológicas do solo, que interferem nas relações solo/água/planta, bem como na dinâmica dos nutrientes do solo, que repercutirão em condições ambientais mais favoráveis para que as plantas explorem todo o seu potencial genético.

Galvão (2002), estudando os efeitos de diferentes sistemas de preparo de um Argissolo na Usina Coruripe (AL), concluiu que a subsolagem proporcionou melhoria na compactação do solo, aumentou a taxa de infiltração da água no solo e proporcionou aumento na produtividade da cana-de-açúcar. O autor também concluiu que o sistema de destruição da soqueira com herbicida e subsolagem mostrou-se como o mais promissor.

5 – Qualidade do Solo

A relação entre o manejo e a qualidade do solo pode ser avaliada pelo comportamento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Doran & Parkin, 1994). O efeito do manejo sobre as propriedades físicas do solo é dependente da sua textura e mineralogia, as quais influenciam a resistência e a resiliência do solo a determinada prática agrícola (Seybold et al., 1999).

Qualidade do solo tem sido definida como a capacidade do solo de funcionar como sustento para a produtividade de plantas e de animais, de manter ou de aumentar a qualidade da água e do ar promovendo a saúde

humana (Doran & Parkin, 1994). Essa definição reflete a natureza viva e dinâmica do solo e tem também servido de orientação para a elaboração de diversos modelos para a determinação de índices de qualidade do solo ao longo dos últimos 15 anos (Doran & Parkin, 1994; Karlen & Stott, 1994). Esses modelos têm sido aplicados para comparar e monitorar o impacto de práticas de manejo sobre a qualidade do solo em diversos sistemas agrícolas e florestais, ou em microbacias (Chaudhury et al., 2005). Em comum, esses modelos envolvem a escolha de um conjunto mínimo de indicadores, a transformação dos valores dos indicadores em escores, e a combinação desses escores para gerar o índice (Andrews et al., 2002). A complexidade e diversidade dos solos e a sua multiplicidade de usos, entretanto, estabelecem vários obstáculos à definição e padronização de um modelo universal. Isso é expresso pela falta de consenso sobre quais funções, indicadores ou métodos de indexação devem ser usados na avaliação e de como essas variáveis devem ser alteradas em razão do tipo ou uso do solo em questão.

Um aspecto de uso cada vez mais comum na avaliação da qualidade do solo são as ferramentas de análise estatística multivariada. Estas levam em consideração a correlação de muitas medidas simultaneamente, permitindo a extração de uma grande quantidade de informações e a simplificação da interpretação de dados em sistemas complexos como o solo (Tótola & Chaer, 2002). Dentre os métodos de análise mais usados estão as ordenações multivariadas, as quais permitem avaliar a similaridades entre "casos" (tratamentos experimentais, áreas com diferentes históricos de manejo etc.) com base em um conjunto de "n" variáveis (indicadores de qualidade). A ordenação consiste simplesmente no arranjo dos "casos" ao longo de um eixo ou de múltiplos eixos, de forma a sumarizar relacionamentos complexos, extraindo um ou poucos padrões dominantes a partir de um infinito número de padrões possíveis (McCune & Grace, 2002). O método mais comumente usado para produzir ordenações é a análise de componentes principais ou sua variante, a análise de fatores. Na análise de componentes principais são geradas combinações lineares das variáveis originais, denominadas componentes principais. Cada componente principal consiste de uma variável nova e independente que explicam partes da variância total contida nos dados originais. Os primeiros componentes principais extraídos na análise explicam a maior parte da informação relevante, simplificando com isso, a interpretação

dos dados e eliminando as informações desnecessárias. Recentemente, o método de ordenação denominado “nonmetric multidimensional scaling” ou simplesmente NMS (Shepard, 1962), tem se apresentado como uma alternativa atraente aos métodos tradicionais citados, uma vez que permite avaliar faixas muito mais abrangentes de estrutura nos dados (McCune & Grace, 2002).

MATERIAL E MÉTODOS

1 – Localização e Caracterização das Áreas Experimentais

O trabalho foi desenvolvido em áreas localizadas entre os paralelos 10°01'59" e 10°02'58" S e, os meridianos 36°10'22" e 36°12'35" W, da Fazenda Progresso de propriedade da Usina Coruripe, localizada no município de Coruripe – AL. O clima do local é tropical chuvoso com verão seco segundo Köppen. A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1.400 mm e temperatura média de 24,4°C. O solo avaliado foi classificado como ARGISSOLO Amarelo Distrocoeso (Embrapa, 2006), relevo plano, textura média (leve)/argilosa, formado do sedimento grupo Barreiras, característico da unidade geomorfológica Tabuleiros Costeiros (Jacomini et al., 1975).

Foram selecionadas cinco áreas cultivadas com cana-de-açúcar representando diferentes tempos de uso e tipos de cultivo: 4 anos cultivo de inverno (4 anos I); 14 anos cultivo de inverno (14 anos I); 14 anos cultivo de verão (14 anos V); 30 anos cultivo de inverno (30 anos I); 30 anos cultivo de verão (30 anos V) e uma área de mata (Mata), tipo floresta subperenifólia, que foi considerada testemunha padrão, totalizando seis tratamentos. Todas as áreas cultivadas com cana-de-açúcar se encontravam no quarto corte.

Conforme informações obtidas na Usina Coruripe, os sistemas de plantio de inverno e verão para renovação dos canaviais apresentam as características descritas a seguir:

Plantio de inverno: durante o mês de abril é realizada semeadura de *Crotalaria spectabilis*, a lanço com avião, seguida de subsolagem (60 cm de profundidade). Após o desenvolvimento vegetativo da leguminosa, é realizada a abertura de sulcos, plantio da cana e aplicação de herbicida (Paraquat + Metribuzin), durante os meses de julho/agosto (inverno chuvoso).

Plantio de verão irrigado: durante todo o período da colheita que ocorre de setembro a março (verão seco), é realizado o preparo do solo com uma gradagem média (discos 26") para posterior subsolagem (60 cm de profundidade) e abertura dos sulcos de plantio, onde é aplicado o composto orgânico na dosagem de 30 Mg ha⁻¹. Após o plantio é aplicado herbicida pré-emergente (Metribuzim).

Nos dois sistemas, após cada colheita da cana queimada, é realizada uma tríplice operação de escarificação/adubação/cultivo, que ocorre durante os meses de setembro a março. Durante o ciclo vegetativo da cana são realizados tratamentos fitossanitários por meio de pulverizadores costais, mecanizados ou por aviação agrícola.

Para caracterização pedológica das áreas experimentais foram abertas quatro (repetições) mini-trincheiras em cada área experimental, com objetivo de localizar no perfil do solo os horizontes A ou Ap, AB e Bt, totalizando 24 pontos amostrais (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização pedológica das áreas experimentais.

REP	TRATAMENTO					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
	Hor: Prof; Text	Hor: Prof; Text	Hor: Prof; Text	Hor: Prof; Text	Hor: Prof; Text	Hor: Prof; Text
I	A: 0-17; AF	Ap: 0-15; AF	Ap: 0-16; AF	Ap: 0-16; AF	Ap: 0-13; AF	Ap: 0-21; AF
	AB: 17-27; FA	AB: 15-27; FA	AB: 16-31; FA	AB: 16-28; FA	Ab: 13-30; FA	AB: 21-30; FA
	Bt: 27-63; RA	Bt: 27-60; FRA	Bt: 31-65; FRA	Bt: 28-66; RA	Bt: 30-60; RA	Bt: 30-60; FRA
	Btx: 63+; RA	Btx: 60+; FRA	Btx: 65+; RA	Btx: 66+; RA	Btx: 60+; RA	Btx: 60+; RA
II	A: 0-14; AF	Ap: 0-14; AF	Ap: 0-18; AF	Ap: 0-22; AF	Ap: 0-20; AF	Ap: 0-21; AF
	AB: 14-24; FA	AB: 14-30; FRA	AB: 18-32; FRA	AB: 22-29; FA	AB: 20-30; FA	AB: 21-33; FA
	Bt: 24-70; RA	Bt: 30-70; RA	Bt: 32-77; FRA	Bt: 29-85; FRA	Bt: 30-60; RA	Bt: 33-77; RA
	Btx: 70+; R	Btx: 70+; RA	Btx: 77+; RA	Btx: 85+; RA	Btx: 60+; RA	Btx: 77+; RA
III	A: 0-14; AF	Ap: 0-24; AF	Ap: 0-18; AF	Ap: 0-19; AF	Ap: 0-15; AF	Ap: 0-16; AF
	AB: 14-28; FA	AB: 24-35; FA	AB: 18-32; FRA	AB: 19-30; FA	AB: 15-30; FA	AB: 16-28; FA
	Bt: 28-70; RA	Bt: 35-70; RA	Bt: 32-70; RA	Bt: 30-70; FRA	Bt: 30-55; RA	Bt: 28-60; RA
	Btx: 70+; RA	Btx: 70+; RA	Btx: 70+; R	Btx: 70+; RA	Btx: 55+; RA	Btx: 60+; R
IV	A: 0-13; AF	Ap: 0-21; AF	Ap: 0-18; AF	Ap: 0-14; AF	Ap: 0-13; AF	Ap: 0-21; AF
	AB: 13-25; FA	AB: 21-35; FRA	AB: 18-30; FA	AB: 14-27; FA	AB: 13-30; FA	AB: 21-31; FA
	Bt: 25-85; RA	Bt: 35-68; RA	Bt: 30-80; RA	Bt: 27-70; FRA	Bt: 30-60; RA	Bt: 31-63; FRA
	Btx: 85+; R	Btx: 68+; RA	Btx: 80+; R	Btx: 70+; RA	Btx: 60+; RA	Btx: 63+; RA

Hor: horizonte; Prof: profundidade (cm); Text: textura ao tato; AF: areia franca; FA: franco arenosa; FRA: franco argilo arenosa; RA: argilo arenosa; R: argila

2 – Amostragem do Solo

Definida a caracterização pedológica das áreas experimentais, foi determinado que as amostras, representativas dos três horizontes, fossem retiradas no topo das profundidades de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm. Em cada ponto amostral, foram retiradas 12 amostras indeformadas, para cada profundidade, totalizando 864 amostras, que foram extraídas nas entrelinhas das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, e aleatoriamente na área de mata. Essas amostras foram retiradas por meio de um trado de Uhland com anéis de PVC com, aproximadamente, 5,2 cm de diâmetro por 2,0 cm de altura. O volume de cada anel foi determinado considerando a média da medida de dois diâmetros e a média de quatro medidas de altura, utilizando um paquímetro digital. No momento da amostragem, foi retirada uma camada de 5 cm do topo de cada profundidade, para então ser cravado o trado de Uhland, ficando as amostras indeformadas com profundidade efetiva de 5 a 7 cm, 25 a 27 cm e 45 a 47 cm, representando o topo das profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, respectivamente. Para preservação das características físicas e umidade do solo, os cilindros contendo as amostras indeformadas foram envoltos em papel alumínio, parafinados e etiquetados. Foram consideradas as mesmas profundidades no momento da extração das 72 amostras deformadas, que continham aproximadamente 3 kg, e foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas de forma a preservar ao máximo a estrutura original.

Em ambiente apropriado, as amostras deformadas foram secas ao ar e beneficiadas, conforme a necessidade de cada análise física e de matéria orgânica. As amostras indeformadas foram organizadas e armazenadas em estante, tendo suas embalagens retiradas e as superfícies aparadas somente no momento da sua utilização.

3 – Análises Físicas do Solo

Todas as análises para determinação dos atributos de física do solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Tabuleiros Costeiros.

3.1 – Granulometria e Grau de Floculação

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro de Boyoucos. Cada amostra de 50 g de TFSA foi pesada em becker de 250 mL onde foram adicionados 25 mL de NaOH a 1 N e 100 mL de água destilada. A mistura foi agitada manualmente com bastão de vidro, permanecendo em repouso durante uma noite. Após a dispersão química a suspensão foi transferida para copo metálico e submetida à agitação mecânica por cinco minutos em agitador elétrico. Após a agitação mecânica o conteúdo do copo metálico foi transferido para peneira de 0,053 mm apoiada sobre um funil de vidro, tendo uma proveta de 1000 mL abaixo para coleta da suspensão de silte e argila. A areia retida na peneira foi lavada com água destilada até que o volume da proveta atingisse aproximadamente 900 mL.

A areia, transferida para becker de 50 mL e seca em estufa 105°C por 4 h, foi passada em jogo de peneiras de 1; 0,5; 0,25; 0,106 e 0,053 mm, para determinação do teor nas classes de areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e areia muito fina (AMF), respectivamente, sendo que, a areia total (AT) é a soma das cinco classes.

O volume da proveta foi completado até 1000 mL e a suspensão agitada manualmente com bastão contendo tampa perfurada na sua extremidade inferior. Após 90 min, a suspensão dos 250 mL superiores foi transferida, por meio de sifão, para proveta de 250 mL, onde foi realizada a leitura da argila com o densímetro de Boyoucos. Para correção da temperatura foi realizada a leitura do branco, constituído por 25 mL de NaOH a 1N diluído em 1000 mL de água destilada. Os teores de areia, silte e argila foram calculados conforme demonstrado a seguir:

$$\text{Classe de Areia} = PA * 20 * fc$$

$$AT = AMG + AG + AM + AMF + AF$$

$$\text{Argila} = (LA - LB) * 20 * fc$$

$$\text{Silte} = 1000 - AT - \text{Argila}$$

Em que:

Classe de Areia = teor de areia para cada classe (g kg^{-1});

PA = areia retida na peneira da respectiva classe (g);

AT = areia total (g kg^{-1});

Argila = teor de argila (g kg^{-1});

LA = leitura da argila;

LB = leitura do branco;

Silte = teor de silte (g kg^{-1});

fc = fator de correção de umidade da amostra de TFSA.

O fc foi calculado por meio da razão entre peso da amostra úmida e peso da amostra seca (peso amostra úmida = 20 g e peso amostra seca => estufa a 105°C por 24 h).

Para obtenção do grau de flocculação, a argila dispersa em água foi determinada por meio da mesma metodologia descrita anteriormente, no entanto, realizando a dispersão da amostra sem a presença do NaOH. Os cálculos foram realizados conforme descrito a seguir:

$$ADA = (LA - LB) * 20 * fc$$

$$GF = \left[1 - \left(\frac{ADA}{Argila} \right) \right] * 100$$

Em que:

ADA = argila dispersa em água (g kg^{-1});

LA = leitura da argila dispersa em água;

LB = leitura do branco (água destilada);

fc = fator de correção de umidade;

GF = grau de flocculação (%);

Argila = teor de argila (g kg^{-1}).

3.2 – Densidade de Partícula

A densidade de partícula (D_p) foi obtida por meio do método do picnômetro, que tem princípio na determinação da massa de solo necessário para completar a capacidade de um picnômetro, contendo água destilada,

fervida e deaerada, conforme procedimentos descritos a seguir.

Inicialmente foi determinada a massa do conjunto: picnômetro com tampa (previamente identificado) contendo água destilada. Ao picnômetro vazio foi adicionado 10 g de terra fina seca em estufa (105°C por 24 h) juntamente com aproximadamente 25 mL de água destilada, fervida e deaerada. Após uma leve agitação, o picnômetro, sem tampa, contendo solo e água foi colocado em um dessecador, onde foi aplicado vácuo por 5 min, com objetivo de preencher toda porosidade da amostra de solo com água. Após esse procedimento, o picnômetro foi preenchido com água destilada, fervida e deaerada, para colocação da tampa, de tal maneira que o seu capilar ficasse completamente preenchido por água. Depois de ter seu exterior seco, o conjunto (picnômetro + tampa + solo + água) foi novamente pesado em balança com precisão de 0,01 g, e medida a temperatura do sistema para correção da densidade da água.

Os cálculos para determinação da D_p foram efetuados conforme a equação a seguir:

$$D_p = [10/(10 + a - b)] * D_a$$

Em que:

D_p = densidade de partícula ($Mg\ m^{-3}$);

10 = massa de solo utilizada (g);

a = picnômetro + tampa + água (g);

b = picnômetro + tampa + água + solo (g);

D_a = densidade da água corrigida pela temperatura ($Mg\ cm^{-3}$);

3.3 – Estabilidade de Agregados em Água

Esta análise foi realizada com adaptações do método de peneiramento úmido em aparelho de oscilação vertical (Kemper & Chepil, 1965).

Amostras deformadas de campo foram destorroadas com as mãos, cuidadosamente, quebrando os agregados maiores nos planos de fratura, para posterior secagem ao ar. As amostras secas foram peneiradas, evitando movimentos muito fortes, em sequência de peneira com 4 mm e 2 mm de

abertura de malha. Foram utilizados como amostras os agregados com diâmetro entre 2 e 4 mm.

Foram pesadas três amostras de 25 g, sendo duas utilizadas como repetições de laboratório e a terceira para determinação do fator de correção de umidade (f_c).

As amostras, referentes às duas repetições de laboratório, foram saturadas por capilaridade, durante 4 min, sobre papel filtro colocado sobre a primeira peneira da sequência de peneiras com abertura de malha de 2,0; 1,0; 0,5 e 0,25 mm. Após o umedecimento, as amostras foram transferidas para a malha de 2,0 mm com o auxílio de uma pisceta. As amostras saturadas foram submetidas ao peneiramento úmido por quatro minutos, por meio de aparelho que apresenta 4 cm de curso com 42 ciclos por minuto. Os agregados retidos nas quatro peneiras foram transferidos para vidros distintos e secos em estufa a 105°C por 24 h, para posterior pesagem e determinação de peso seco de agregados retidos em cada peneira.

Após a pesagem, foram adicionados 6 ml de NaOH a 1N, realizada agitação e repouso por 5 min. Os agregados dispersos quimicamente foram transferidos para copo metálico juntamente com aproximadamente 300 mL de água e dispersos mecanicamente com agitador elétrico. Após a dispersão, cada conteúdo foi passado novamente na sua peneira de origem, para retenção dos grãos de areia maiores do que a malha. A areia retida, em cada peneira, foi transferida para o vidro com auxílio de pisceta, seca em estufa a 105°C por 4 h e pesada.

Os cálculos para obtenção dos indicadores de estabilidade de agregados em água foram realizados conforme descrito a seguir:

a) Agregação

$$\%AGR = \sum AGi$$

$$AGi = [(W_{Ai} - W_{ai}) / 25] * f_c * 100$$

Em que:

%AGR = porcentagem de agregação (%);

AG_i = agregação por classe (%);

W_{Ai} = massa seca de agregado da classe (g);

W_{ai} = massa seca de areia da classe (g);

25 = massa total da amostra (g);

f_c = fator de correção de umidade.

b) Agregados Estáveis em Água

$$\% AEA = \sum AEA_i$$

$$AEA_i = \left(\frac{W_{Ai}}{25} \right) * f_c * 100$$

Em que:

$\% AEA$ = porcentagem de agregados estáveis em água (%);

AEA_i = agregados estáveis em água por classe (%);

W_{Ai} = massa seca de agregado da classe (g);

25 = massa total da amostra (g);

f_c = fator de correção de umidade.

c) Diâmetro Médio Ponderado de Agregados Estáveis em Água

O DMP foi obtido conforme sugerido por Kemper & Rosenau (1986):

$$DMP = \sum (AEA_i * d_i / 100)$$

Em que:

DMP = diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água (mm);

AEA_i = agregados estáveis em água por classe (%);

d_i = diâmetro médio da classe (mm)

Classes : 4,00 a 2,00 mm – $d_i = 3,000$ mm

1,00 a 2,00 mm – $d_i = 1,500$ mm

0,50 a 1,00 mm – $d_i = 0,750$ mm

0,25 a 0,50 mm – $d_i = 0,375$ mm

3.4 – Curva Característica de Retenção de Água no Solo

O método utilizado para obtenção da curva característica de retenção de água do solo foi por dessorção (secamento) de amostras indeformadas. Após a saturação por capilaridade durante 24 h, as amostras tiveram sua umidade estabilizada em oito sucções de potenciais matriciais: -1, -4, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa. Para tensões de -1 a -10 kPa foi utilizada mesa de tensão, e câmaras de Richards para tensões de -33 a -1500 kPa. Após a estabilização da umidade para as tensões aplicadas (ocorrido entre 48 e 72 h), as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à penetração em laboratório, pesadas em balança com precisão de 0,01 g (peso do solo úmido), prensadas no ensaio de compressibilidade, transferidas para latas de alumínio e secas em estufa a 105°C por 24 horas para determinação da umidade gravimétrica e volumétrica, conforme equações descritas a seguir:

$$\theta_g = (PSU - PSS) / PSS$$

$$\theta_v = \theta_g * D_s$$

Em que:

θ_g = umidade gravimétrica (kg kg^{-1});

PSU = massa da amostra úmida (kg);

PSS = massa da amostra seca (kg);

θ_v = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}).

Os valores da umidade volumétrica foram ajustados segundo modelo de Van Genuchten, utilizando o programa CURVARET versão 2.16 (Departamento de Agricultura – ESALQ), e plotados em função das tensões de sucção aplicadas. Para umidade de saturação foi considerada a porosidade total, determinada conforme descrito no subitem apresentado a seguir.

3.5 – Densidade do Solo e Porosidade

A densidade do solo (D_s) e o volume total de poros (VTP) total foram calculados utilizando os valores do peso da amostra seca (PSS) e o volume do anel de PVC que continha a amostra, conforme equações a seguir:

$$D_s = PSS/VA$$

$$VTP = [1 - (D_s/D_p)]$$

Em que:

D_s = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

PSS = massa da amostra seca (Mg);

VA = Volume do anel (m^3);

VTP = volume total de poros ($m^3\ m^{-3}$);

D_p = densidade de partícula ($Mg\ m^{-3}$).

A microporosidade (VMicro) foi determinada por meio da umidade volumétrica da amostra submetida à tensão de sucção de $-6\ kPa$. A macroporosidade (VMacro) foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.6 – Resistência do Solo à Penetração em Laboratório

As amostras indeformadas, com umidade estabilizada em oito sucções de potenciais matriciais ($-1, -4, -6, -10, -33, -100, -500$ e $-1500\ kPa$) foram submetidas ao ensaio de resistência à penetração em laboratório (RPL) utilizando um penetrógrafo de bancada da marca Marconi, equipado com célula de carga contendo haste com cone de $4\ mm$ de diâmetro e ângulo de 45° . A velocidade de penetração constante foi calibrada para $10\ mm\ min^{-1}$, tendo cada ensaio uma duração de $80\ s$. Para o cálculo da resistência à penetração média, de cada ensaio, foram considerados os dados de força de penetração entre 40 e $80\ s$, sendo que, o equipamento registra, por meio de software e PC, um dado de força de penetração (kgf) a cada segundo. A resistência à penetração foi calculada conforme equação apresentada a seguir:

$$RPL = \left(\frac{Fp}{0,1275} \right) * 98,0665$$

Em que:

RPL = resistência à penetração em laboratório (kPa);

Fp = força de penetração média (kgf);

0,1257 = área do cone (cm²);

98,0665 = transformação de kgf cm⁻² para kPa.

3.7 – Intervalo Hídrico Ótimo

Por meio da curva de resistência à penetração e curva característica de retenção de água, foi calculado o intervalo hídrico ótimo conforme descrito por Wu et al. (2003):

(a) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$) => IHO = $\theta_{cc} - \theta_{pmp}$;

(b) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$) => IHO = $\theta_{cc} - \theta_{rp}$;

(c) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$) => IHO = $\theta_{pa} - \theta_{pmp}$;

(d) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$) => IHO = $\theta_{pa} - \theta_{rp}$.

Em que:

IHO = intervalo hídrico ótimo.

θ_{pa} = umidade volumétrica do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (VTP-0,1);

θ_{cc} = umidade volumétrica na capacidade de campo (água retida a -10 kPa);

θ_{pmp} = umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (água retida na tensão de -1500 kPa);

θ_{rp} = umidade volumétrica quando a resistência do solo a penetração é maior ou igual a 2000 kPa.

Os Valores de VTP, θ_{cc} e θ_{pmp} foram estimados por meio da curva característica de retenção de água, e os valores de θ_{rp} estimados por meio dos modelos de regressão ajustados para estimativa da resistência do solo à penetração em função da umidade.

3.8 – Ensaio de Compressibilidade

Após o ensaio de RPL, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando uma prensa mecânica de acionamento manual, da marca Solotest, por meio da qual foram aplicadas cargas verticais correspondentes à pressões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, conforme norma de Ensaio de Adensamento Unidimensional – MB 3336 da ABNT (1990). A razão de carga foi igual a 2 e os estágios de carregamentos foram de 30 s. O objetivo descrito pela norma MB-3336 da ABNT (1990), foi concebido pela engenharia civil para estimar a capacidade de suporte de carga de solos sob edificações, ou para a estimativa de recalque de taludes, aterros, estruturas de sustentação etc. Para isso, os ensaios são realizados em amostras saturadas, com tempo de longa duração (até 24 h por carga aplicada). No entanto, para se determinar a compressibilidade em solos agrícolas, entendemos que os ensaios devem ser adaptados, consistindo em aplicar pressões com tempo curto de duração para os carregamentos em amostras de solo não saturadas, considerando que, as pressões exercidas pelas máquinas agrícolas são aplicadas ao solo em horizontes superficiais ou subsuperficiais, normalmente não saturado, e de forma instantânea e intermitente.

Para cada carga aplicada foi medida a deformação vertical da amostra, por meio de micrômetro com precisão de 0,001 mm. A entrada dos dados de densidade de partícula, peso do solo seco, peso do solo úmido, dimensões do anel de PVC e valor da deformação vertical (para cada carga aplicada), foi realizada no programa “Compress” (Reinert et al., 2003), que determina a pressão de pré-compactação (σ_p), índice de compressibilidade (IC) e índice de recompressão (CR), por meio da curva de compressão. O método utilizado para determinação da σ_p foi o Pacheco e Silva – 03 (ABNT, 1990).

3.9 – Densidade Máxima, Umidade Crítica e Grau de Compactação

A umidade crítica e a densidade máxima foram determinadas por meio da curva de compactação (densidade do solo x umidade gravimétrica) obtida pelo ensaio de proctor normal. Para realização do ensaio foi utilizado um Proctor com dimensões reduzidas em relação ao aparelho considerado na

norma NBR 7182 (ABNT, 1986), que utiliza 1000 cm^3 de solo para cada ensaio, o que implica em um grande volume de solo a ser transportado, quando o número de testes é grande com amostras não reaproveitadas para diferentes umidades. Portanto, foi construído um proctor que comporta, em um cilindro de ferro, amostras com $113,70 \text{ cm}^3$ (5,38 cm de diâmetro e 5,00 cm de altura). As amostras receberam golpes de um martelo cilíndrico com peso de 1,8 kg, com 30,5 cm de altura de queda. Ficou definido que deveriam ser aplicados 12 golpes para obtenção da energia de compactação mais próxima da utilizada no ensaio normal ($5,95 \text{ kg cm cm}^{-3}$), conforme equação descrita por Stancati et al. (1981):

$$E_c = (P * h * N) / V$$

Em que:

E_c = Energia de compactação (kg cm cm^{-3});

P = Massa do Martelo (kg);

h = Altura de queda do Martelo (cm);

N = Número de golpes;

V = Volume de solo (cm^3).

Foram preestabelecidas seis umidades a serem utilizadas nos testes, sendo que, três deveriam ficar abaixo e duas acima da umidade crítica, estimado pela equação de regressão: $U_c = [7,0709 + 0,2255 * (A + S)] / 100$
 $R^2 = 0,82$, sugerida por Nhantumbo & Cambule (2006).

Em que:

U_c = Umidade crítica (kg kg^{-3});

$A+S$ = Argila + Silte (%).

As amostras de solo seco ao ar, passadas em peneira de 4 mm, foram acondicionadas em sacos plásticos e umedecidas com volume de água calculado para obtenção aproximada das umidades preestabelecidas. As amostras permaneceram hermeticamente fechadas por 24 h para

uniformização da umidade, sendo agitadas suavemente por três vezes durante este período.

Depois de aplicar 12 golpes sobre a amostra, o proctor foi aberto para realização da medida da deformação (paquímetro digital) do corpo de prova, que foi transferido para lata de alumínio, pesado em balança com precisão de 0,01 g e secos por 24 h em estufa a 105°C, para determinação do peso úmido da amostra, do peso seco da amostra, da umidade gravimétrica e densidade final, calculada conforme equação descrita a seguir:

$$Df = PSS / [(5 - d) * 22,73]$$

Em que:

Df = densidade final do solo (Mg m^{-3});

PSS = massa do solo seco (g);

5 = altura do cilindro (cm);

d = deformação da amostra (cm);

22,73 = área do cilindro.

Foram realizadas análises de regressão, por meio do programa estatístico SAEG 9.1, para ajuste do modelo quadrático de densidade do solo em função da umidade. Por meio da derivação das equações quadráticas foram obtidos os valores de densidade máxima (DM) e da umidade crítica (UC).

O grau de compactação foi calculado por meio da relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade máxima obtida pela curva de compactação do ensaio de Proctor adaptado, conforme descrito por Caputo (1980):

$$GC = (D_s / DM) * 100$$

Em que:

GC = grau de compactação (%);

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3});

DM = densidade máxima do solo (Mg m^{-3}).

3.10 – Condutividade Hidráulica Saturada

Para determinação da condutividade hidráulica saturada (K_o), as amostras de solo indeformadas foram submetidas a uma carga hidráulica constante e fluxo descendente, conforme método descrito pela Embrapa (1997). Após um período de saturação por 24 horas, as amostras foram submetidas a um fluxo, sendo o percolado coletado a cada 30 minutos por oito vezes. Para os cálculos foram considerados os volumes coletados na última medida, ou a média das duas últimas, quando observadas uma variação maior que 5% entre elas. A condutividade hidráulica saturada foi determinada conforme a equação de Darcy:

$$K_o = (V * L) / (t * A * H)$$

Em que:

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

V = Volume coletado (cm^3);

L = altura do bloco (amostra) de solo (cm);

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

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

t = intervalo de tempo (h).

4 – Matéria Orgânica

As análises para determinação dos teores de matéria orgânica do solo foram realizadas no Laboratório de Fertilidade e Nutrição de Plantas da Embrapa Tabuleiros Costeiros.

4.1 – Matéria Orgânica Total

O teor de matéria orgânica total (MOT) foi determinado pelo método volumétrico, com titulação do excesso de bicromato de potássio pelo sulfato ferroso amoniacal, conforme descrito por Embrapa (1999):

$$MOT = CO * 1,724$$

Em que:

MOT = matéria orgânica total (g kg⁻¹);

CO = carbono orgânico (g kg⁻¹);

1,724 => na composição média da MO do solo o carbono participa com 58%.

4.2 – Matéria Orgânica Particulada

O fracionamento físico da matéria orgânica foi realizado segundo Cambardella & Elliot (1992). Os erlenmeyers de 250 mL, contendo amostras de 20 g de terra fina seca ao ar e 70 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹), foram agitados durante 15 horas em agitador horizontal. A seguir, a suspensão foi lavada em peneira de 0,053 mm com auxílio de jato d'água. O material retido na peneira, que consiste em areia e matéria orgânica particulada (>0,053 mm), foi seco em estufa a 50°C. Após ter sido quantificada sua massa, em balança com precisão de 0,01 g, o material foi moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de matéria orgânica (MO), pelo método volumétrico, com titulação do excesso de bicromato de potássio pelo sulfato ferroso amoniacal, conforme descrito por Embrapa (1999).

Obtido o valor do teor de matéria orgânica, a MOP foi calculada conforme descrito a seguir:

$$MOP = [MO * (Wa/20)] * fc$$

Em que:

MOP = matéria orgânica particulada (g kg⁻¹);

MO = teor de matéria orgânica >0,053 mm (g kg⁻¹);

Wa = massa seca da areia retida na peneira 0,053 mm (g);

20 = peso total da amostra (g);

fc = fator de correção da umidade da amostra.

4.3 – Matéria Orgânica Complexada

O teor de matéria orgânica associada aos minerais ou matéria orgânica complexada (MOC) foi calculado pela diferença entre os teores de MOT e MOP.

4.4 – Porcentagem de Matéria Orgânica Particulada e Complexada

$$\%MOP = (MOP/MOT) * 100$$

$$\%MOC = (MOC/MOT) * 100$$

5 – Análise dos Dados

Foram realizadas análises de regressão, por meio do programa estatístico SAEG 9.1, para obtenção dos parâmetros de ajuste “a” e “b” dos modelos matemáticos de pressão de pré-compactação (σ_p) e resistência do solo à penetração em laboratório (RPL) em função da umidade gravimétrica do solo (θg), conforme os modelos propostos por Dias Junior (2000), descritos a seguir: $\sigma_p = 10^{(a+b.\theta g)}$, $RPL = 10^{(a+b.\theta g)}$.

Para determinação do grau de associação, entre os atributos físicos e da matéria orgânica do solo com a pressão de pré-compactação e resistência a penetração, foram realizadas análises de correlação de “trilha” (análise de trilha ou “path coefficient analysis”), que fornece quantidades, chamadas coeficientes de trilha, que medem a influência direta de uma variável sobre outra, independentemente das demais, no contexto das relações de causa e efeito. Foram consideradas como variáveis dependentes a pressão de pré-compactação (σ_p) e a resistência do solo à penetração em laboratório (RPL). Para variáveis explicativas, foram considerados cinco grupos de atributos do solo: 1) granulometria (areia, silte, argila e GF), 2) estabilidade de agregados em água (%AGR, %AEA e DMP), 3) porosidade (Ds, VTP, VMicro e VMacro), 4) compactabilidade (DM, UC e GC) e 5) matéria orgânica (MOT, MOP, MOC, %MOP e %MOC). Para cada análise de trilha foi composto um conjunto de variáveis, sendo que, foi selecionada, sempre que possível, pelo menos uma variável explicativa de cada grupo de atributo. Para que a análise de trilha apresente consistência, o conjunto de variáveis deve apresentar colinearidade

fraca. Portanto, as seleções foram realizadas com base em análises de multicolinearidade realizadas por meio do programa GENES versão 2007. O coeficiente de correlação indica que há uma relação linear entre duas variáveis, sendo que, a mudança de uma implica na mudança constante no valor médio de outra variável. O conhecimento da associação entre duas variáveis é de grande importância nos trabalhos de ciência do solo. No entanto, uma vez que nesta ciência os fatores ambientais se relacionam de maneira interativa e complexa, o estudo da correlação simples torna-se insuficiente (Gomes, 1996). Portanto, a análise de trilha ou “path coefficient analysis” fornece valores, chamados de coeficiente de trilha, que medem a influência direta de uma variável sobre a outra, independente das demais, no contexto de causa e efeito. Esse tipo de análise, também permite desdobrar coeficientes de correlação simples em seus efeitos diretos e indiretos (Cruz et al., 2004).

Foram realizadas análises de NMS (Nonmetric Multidimensional Scaling) (Kruskal, 1964) ou “Ordenação Multidimensional Não-Métrica”, com o objetivo de avaliar o efeito do tempo e tipo de cultivo com cana-de-açúcar, sobre a qualidade do solo, por meio da correlação dos escores das amostras com as variáveis de matéria orgânica e de atributos de física do solo. Também foi realizada análise de significância da correlação de cada variável analisada com a qualidade do solo. A probabilidade de existir diferença entre dois tratamentos, em cada profundidade, foi obtida por meio da análise de “Multi-Response Permutation Procedures” - MRPP para comparação multivariada entre os mesmos. Para realização das análises de NMS e MRPP foi utilizado o programa PC-ORD 4.0. O programa SAEG 9.1 foi utilizado para as análises de significância das correlações.

Para os cálculos das médias de cada variável estudada, para cada tratamento, foi utilizado o programa estatístico Sisvar 5.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1 – Caracterização granulométrica e grau de flocculação das áreas estudadas

Nas Tabelas 2, 3 e 4 são apresentadas as médias das frações granulométricas para as profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, respectivamente, para os seis tratamentos. As frações granulométricas foram divididas em argila, silte, argila + silte (A+S), areia total (AT), areia muito grossa (AMG), areia grossa (AG), areia média (AME), areia fina (AF), areia muito fina (AMF), além da determinação do grau de flocculação (GF) por meio da argila dispersa em água, para as seis áreas estudadas (tratamentos).

Tabela 2. Caracterização granulométrica e grau de flocculação na profundidade de 0 a 20 cm para os seis tratamentos.

Frações (g kg ⁻¹)	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
Argila	76	88	86	86	75	91
Silte	56	45	48	41	40	41
S+A	132	133	134	127	115	132
AT	868	867	866	873	885	868
AMG	43	50	46	53	45	42
AG	254	234	226	240	238	200
AME	421	383	423	396	408	404
AF	137	181	154	166	177	198
AMF	13	19	17	18	17	24
GF (%)	77,47	63,48	74,38	87,71	63,10	69,52

S+A = silte mais argila; AT = areia total; AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AME = areia média; AF = areia fina; AMF = areia muito fina e GF = porcentagem de grau de flocculação.

Para profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 2) houve uma boa uniformidade da granulometria entre as áreas estudadas, apresentando uma média geral para teores de argila, silte e areia de 84, 45 e 871 g kg⁻¹, respectivamente. Essa característica foi desejável, para que esse atributo não representasse fonte de variação sobre os demais atributos, que normalmente, são correlacionados com a textura.

Provavelmente, por se tratar de um horizonte arenoso, nessa profundidade os tratamentos não apresentaram consistência quanto ao grau de floculação entre os tempos de uso, sendo que, esse atributo que deve ter sido mais influenciado pela dinâmica da matéria orgânica do que pelos minerais de argila.

Para a profundidade de 20 a 40 cm (Tabela 3) foi observada uma maior variação da granulometria entre os tratamentos, provavelmente por se tratar de um horizonte de transição (AB). Para essa profundidade foi observada uma média geral para teores de argila, silte e areia de 186, 67 e 747 g kg⁻¹, respectivamente. As áreas cultivadas por 14 anos apresentaram grau de floculação um pouco menor em relação aos outros tratamentos, porém não indicando nenhuma tendência.

Tabela 3. Caracterização granulométrica e grau de floculação na profundidade de 20 a 40 cm para os seis tratamentos.

Frações (g kg ⁻¹)	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
Argila	151	234	184	169	172	207
Silte	56	65	66	63	81	69
S+A	207	299	250	232	253	276
AT	793	701	750	768	747	724
AMG	40	32	28	44	36	35
AG	135	136	131	176	147	155
AME	287	249	276	288	276	258
AF	296	248	279	230	255	240
AMF	35	36	36	30	33	36
GF (%)	52,95	54,36	45,11	45,60	54,18	49,06

S+A = silte mais argila; AT = areia total; AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AME = areia média; AF = areia fina; AMF = areia muito fina e GF = porcentagem de grau de floculação

Na profundidade de 40 a 60 cm, voltamos a observar uniformidade textural entre os seis tratamentos (Tabela 4). O horizonte Bt das áreas em estudo apresentou uma média geral para teores de argila, silte e areia de 296, 100 e 604 g kg⁻¹, respectivamente. Para essa profundidade houve uma tendência na diminuição do grau de floculação com o aumento do tempo de cultivo com cana-de-açúcar. O menor grau de floculação, nas áreas cultivadas

por mais tempo, deve está relacionada com o maior número de operações de subsolagem ocorridas no processo de renovação das lavouras. Esse fato foi constatado por Galvão (2002), que observou um maior grau de dispersão da argila em camadas mais profundas que receberam subsolagem, quando comparadas a tratamentos com ausência dessa operação.

Tabela 4. Caracterização granulométrica e grau de floculação na profundidade de 40 a 60 cm para os seis tratamentos

Frações (g kg ⁻¹)	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
Argila	291	326	306	297	265	288
Silte	78	78	102	97	127	119
S+A	369	404	408	394	392	407
AT	632	596	592	606	608	593
AMG	30	26	27	32	27	24
AG	125	123	123	139	127	120
AME	219	198	200	222	214	209
AF	217	206	203	177	202	201
AMF	41	43	39	36	38	39
GF (%)	46,29	51,19	39,62	39,89	24,45	27,86

S+A = silte mais argila; AT = areia total; AMG = areia muito grossa; AG = areia grossa; AME = areia média; AF = areia fina; AMF = areia muito fina e GF = porcentagem de grau de floculação

Em média, as áreas estudadas apresentaram teores de argila de 84, 186 e 296 g kg⁻¹ para os horizontes A ou Ap, AB, e Bt, respectivamente, caracterizando o gradiente textural em profundidade dos Argissolos. Para a profundidade de 0 a 20 cm, observou-se uma maior concentração da areia nas frações AG e AME. Nos dois horizontes mais profundos a maior concentração de areia foi nas frações AME e AF, apresentando maiores concentrações de AMF em relação ao horizonte superficial (Tabelas 2, 3 e 4).

2 – Efeito do cultivo da cana-de-açúcar sobre a pressão de pré-compactação, resistência mecânica à penetração e intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo.

2.1 Horizonte A ou Ap (0 a 20 cm)

A seguir são apresentados os resultados das análises de regressão da pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração em função da umidade, bem como, as médias de intervalo hídrico ótimo (IHO), para os seis tratamentos nas três profundidades do Argissolo estudado.

As Figuras 4 e 5 representam as curvas de regressão de pressão de pré-compactação (σ_p) e resistência do solo à penetração em laboratório (RPL) em função da umidade gravimétrica, para a profundidade de 0 a 20 cm do Argissolo das seis áreas estudadas.

Por serem dependentes da quantidade de água existente no solo, tanto a σ_p quanto a RPL variaram em função da umidade do solo (Figuras 4 e 5). Os resultados estão de acordo com Hillel (1980), que afirma que quanto mais baixo os teores de água, mais resistente fica a matriz do solo, conferindo ao mesmo, maior resistência às deformações provocadas por pressões externas. A pressão de pré-compactação e a resistência mecânica do solo à penetração tornaram-se maiores à medida que o solo ficava mais seco. Isso acontece porque a água atua de duas formas sobre a resistência do solo ao cisalhamento: a) diminui a coesão entre as partículas sólidas e b) forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre as mesmas. O resultado é um decréscimo exponencial da pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração com o aumento da umidade. Este comportamento mecânico também foi descrito por Dias Junior (1994), Kondo & Dias Junior (1999) e Silva et al. (2002).

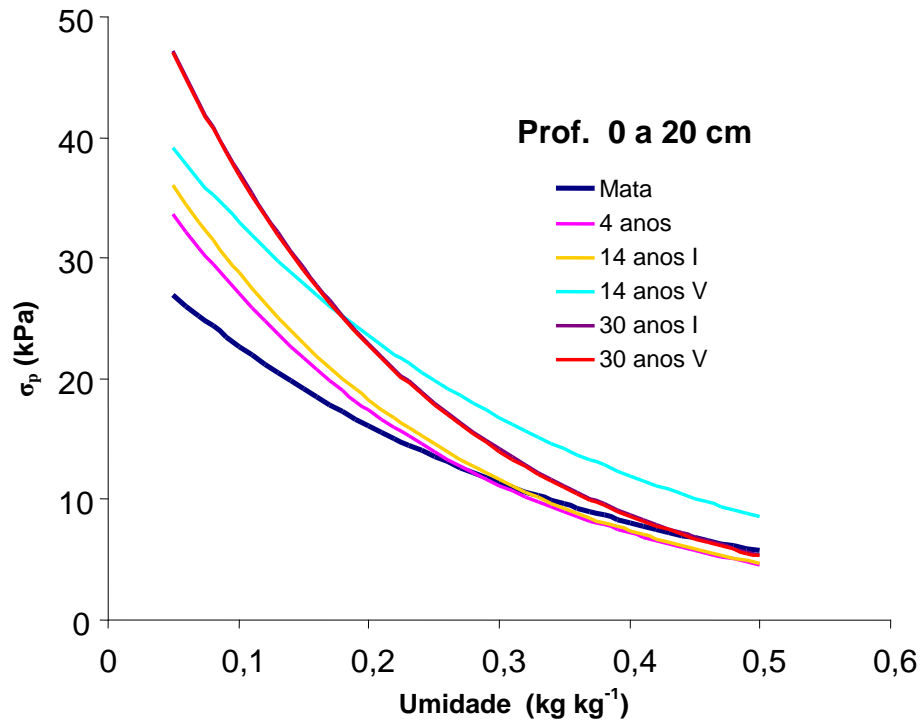


Figura 4. Curvas de pressão de pré-compactação (σ_p) em função da umidade, para os seis tratamentos na profundidade de 0 a 20 cm: $\sigma_p = 10^{(a + b.\theta g)}$.

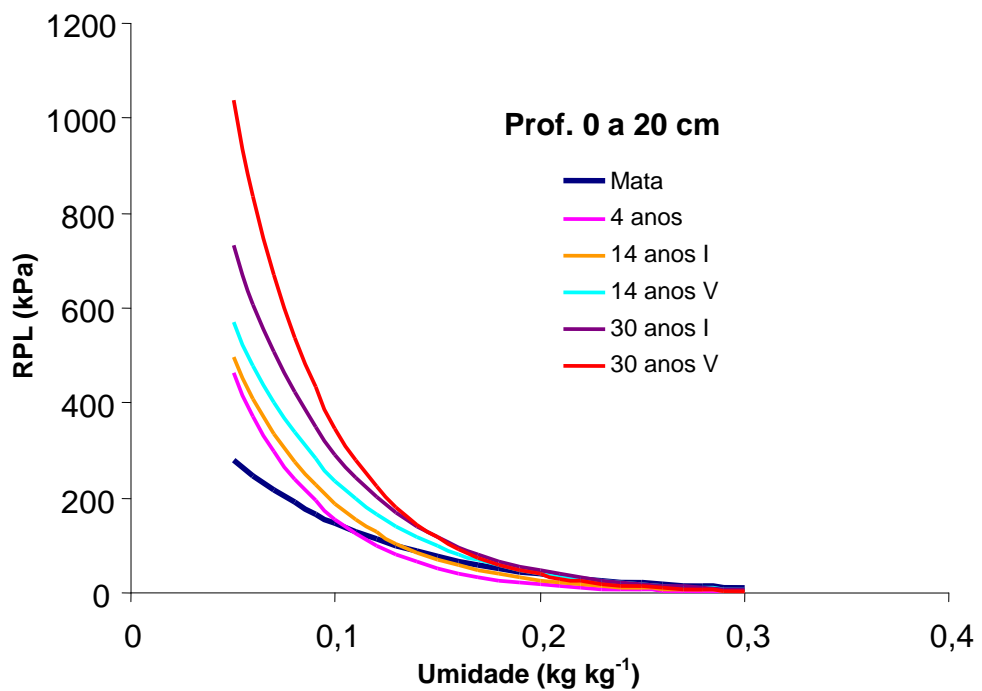


Figura 5. Curvas de resistência do solo à penetração em laboratório em função da umidade, para os seis tratamentos na profundidade de 0 a 20 cm: $RPL = 10^{(a + b.\theta g)}$.

Na profundidade de 0 a 20 cm a mata apresentou comportamento mecânico distinto em relação às áreas cultivadas, o que pode ser comprovado pelos valores dos coeficientes de ajuste “a” e “b” dos modelos de σ_p e RPL, em função da umidade gravimétrica (Tabela 5). Nessa profundidade, o solo da mata apresentou menores valores tanto para o coeficiente angular quanto para o linear, conferindo a esse tratamento uma menor amplitude da σ_p e da RPL durante variações da umidade do solo, em relação às áreas cultivadas. Quando comparadas, as áreas cultivadas apresentaram comportamento semelhante, com exceção do tratamento 14 anos V, que apresentou coeficiente angular similar a Mata, para o modelo de σ_p .

Tabela 5. Coeficientes “a” e “b” das equações de regressão de σ_p e RPL em função da umidade gravimétrica para a profundidade de 0 a 20 cm.

Tratamentos	$\sigma_p = 10^{(a + b.\theta g)}$			RPL = $10^{(a + b.\theta g)}$		
	a	b	R ²	a	b	R ²
Mata	1,5060	-1,4972 **	0,6477	2,7309	-5,6596 **	0,5175
4 anos I	1,6234	-1,9174 **	0,5173	3,1391	-9,4768 **	0,7988
14 anos I	1,6554	-1,9670 **	0,5257	3,1189	-8,4506 **	0,7473
14 anos V	1,6654	-1,4684 **	0,3397	3,1388	-7,6336 **	0,5690
30 anos I	1,7786	-2,0917 **	0,6231	3,2619	-7,9581 **	0,7581
30 anos V	1,7782	-2,1084 **	0,5124	3,4928	-9,5190 **	0,7612

** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de “t”

Ainda na profundidade de 0 a 20 cm observou-se que, para umidades mais elevadas, os seis tratamentos apresentaram valores de σ_p e RPL muito baixos e semelhantes, com variação máxima entre os tratamentos de 7 e 5 kPa para σ_p e RPL (Tabela 6), respectivamente. No entanto, observa-se uma maior diferença entre os tratamentos para umidades mais baixas, havendo uma tendência de maiores valores de σ_p e RPL nas áreas com maior tempo de cultivo com cana-de-açúcar (Figuras 4 e 5), corroborando os resultados obtidos por Oliveira (2008) e Vasconcelos (2009) estudando o comportamento mecânico de um Argissolo, e um Latossolo, respectivamente, quando observaram pequenas diferenças entre a pressão de pré-compactação entre

áreas submetidas a diferentes tipos de manejo, para umidades mais altas, sendo que, em condições de menor umidade, os autores observaram efeitos dependentes do tipo do manejo.

Na umidade correspondente ao ponto de murcha permanente, a mata apresentou 22 e 141 kPa, enquanto que o tratamento 30 anos, com manejo de verão, apresentou 48 e 1135 kPa, para σ_p e RPL, respectivamente (Tabela 6). Esse comportamento poderia ser atribuído a maiores valores de umidade do ponto de murcha permanente (potencial mátrico de -1500 kPa) para a mata, em relação às áreas cultivadas (Figura 6). No entanto, quando padronizamos a umidade em $0,05 \text{ kg kg}^{-1}$ para todos tratamentos, obtemos maiores valores de σ_p e RPL, a medida que se aumenta o tempo de cultivo. (Figura 4 e 5).

Tabela 6. Pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração em laboratório para umidade gravimétrica correspondente à saturação (θ_G s) e ponto de murcha permanente (θ_G pmp), na profundidade de 0 a 20 cm.

Tratamentos	θ_G s (kg kg^{-1})	θ_G pmp (kg kg^{-1})	σ_p s (kPa)	σ_p pmp (kPa)	RPLs (kPa)	RPLpmp (kPa)
Mata	0,437	0,103	7	22	2	141
4 anos I	0,342	0,051	9	34	1	453
14 anos I	0,344	0,051	10	36	2	487
14 anos V	0,336	0,050	15	39	4	572
30 anos I	0,313	0,044	13	49	6	816
30 anos V	0,302	0,046	14	48	4	1135

Essa diferença entre os tratamentos para o horizonte A ou Ap parece também está relacionado com o aumento da densidade (Tabela 7) e diminuição da porosidade total do solo (umidade volumétrica no potencial mátrico igual a zero) com o tempo de cultivo (Figura 6), o que contribuiu para o aumento da capacidade de suporte de carga e da resistência mecânica à penetração de raízes no solo, principalmente, quando são comparadas as áreas cultivadas com a mata.

O incremento da densidade do solo aumenta a fricção entre as partículas sólidas e a coesão no solo, que atuam como principais mecanismos

para o aumento da resistência mecânica do solo à penetração (Vepraskas 1984), e segundo Lebert & Horn (1991) a resistência ao cisalhamento é dependente da densidade e da umidade do solo. A densidade do solo afeta o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, que está diretamente relacionado com número de pontos de contato entre as mesmas, sendo que, para um mesmo material o atrito é tanto maior quanto maior for a densidade do solo, e conseqüentemente, maior quantidade de ponto de contato entre as partículas sólidas do solo.

Na profundidade de 0 a 20 cm, as áreas cultivadas apresentaram maior compactação em relação à área de mata. Porém, mesmo na umidade correspondente ao ponto de murcha permanente, as mesmas não atingiram valores maiores ou iguais a 2000 kPa para resistência a penetração (Tabela 6), que é considerado como limite crítico ao desenvolvimento do sistema radicular da maioria das cultura (Tormena et al., 1998; Lapen et al., 2004; Blainski et al., 2008).

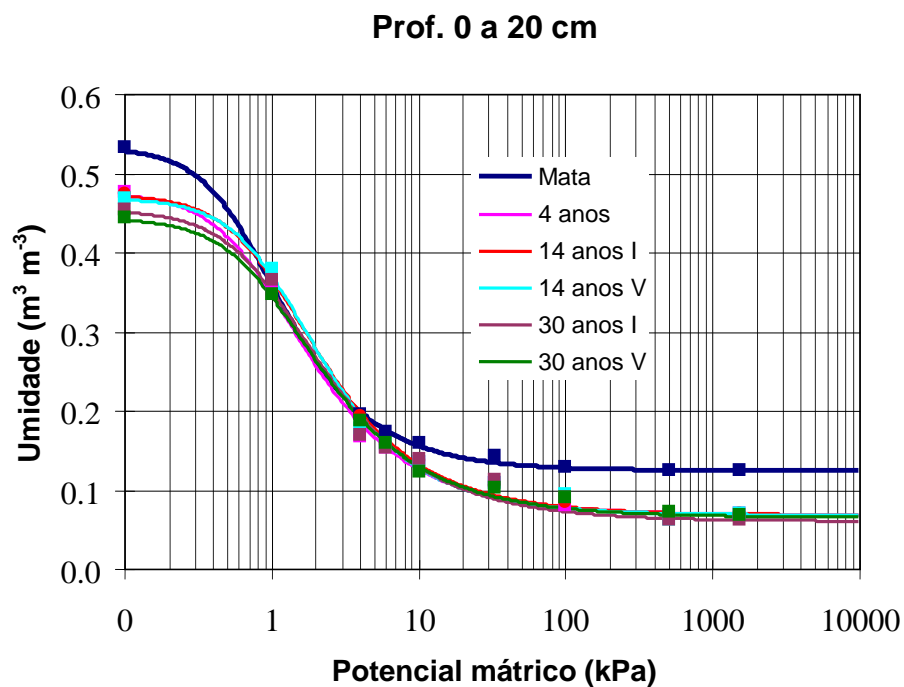


Figura 6. Curvas características de retenção de água para os seis tratamentos na profundidade de 0 a 20 cm.

Por se tratar de um horizonte arenoso, podemos inferir que a resistência mecânica a penetração não é o fator limitante ao desenvolvimento de raízes nos primeiros 20 cm, mas sim, a disponibilidade de água. Portanto, nessa profundidade o intervalo hídrico ótimo (IHO) passa a ser igual à água disponível (AD), que é a diferença entre a umidade da capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), pois a θ_{pa} é maior que a θ_{cc} e a θ_{rp} é menor que a θ_{pmp} (Tabela 7).

Tabela 7. Densidade do solo (D_s), umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{pa}), umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), umidade quando a resistência do solo a penetração é $\geq 2000 \text{ kPa}$ (θ_{rp}) e intervalo hídrico ótimo (IHO), para os seis tratamentos na profundidade de 0 a 20 cm.

Tratamentos	D_s (Mg m^{-3})	θ_{pa} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{cc} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{pmp} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{rp} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	IHO ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Mata	1,21	0,428	0,156	0,125	**	0,031
4 anos I	1,38	0,372	0,126	0,070	**	0,056
14 anos I	1,37	0,371	0,133	0,070	**	0,063
14 anos V	1,39	0,367	0,128	0,070	**	0,058
30 anos I	1,44	0,351	0,129	0,063	**	0,066
30 anos V	1,46	0,341	0,130	0,067	0,029	0,063

** tratamentos que a RPL não atinge 2000 kPa, mesmo com umidade zero (obtido pela curva de RPL em função da umidade).

A mata apresentou θ_{cc} maior do que as áreas cultivadas e, provavelmente, por apresentar maior quantidade de matéria orgânica em decomposição; também apresentou maior θ_{pmp} (Figura 6 e Tabela 7). Essa característica de retenção de água conferiu à mata um menor IHO. Sendo assim, podemos inferir que o cultivo da cana-de-açúcar favoreceu a disponibilidade de água nesse horizonte. Esse resultado converge com afirmações feitas por Camargo (1983) e Dias Junior (2000), que afirmaram que um dos efeitos benéficos da compactação, até certo nível, pode ser atribuído ao aumento da disponibilidade de água em períodos mais secos, em função do maior contato do solo com sementes ou raízes. Segundo Hill et al. (1985), o

aumento da densidade do solo pode proporcionar maior quantidade de água disponível às plantas, porém, tais efeitos variam com a granulometria e teor de matéria orgânica no solo.

2.2 Horizonte AB (20 a 40 cm)

As curvas de regressão para pressão de pré-compactação (σ_p) e resistência do solo à penetração em laboratório (RPL), em função da umidade gravimétrica, para a profundidade de 20 a 40 cm do Argissolo das seis áreas estudadas, encontram-se nas Figuras 7 e 8.

A compressibilidade e resistência mecânica à penetração do horizonte AB, para os seis tratamentos, apresentou comportamento similar ao do horizonte superficial, porém, com valores absolutos bem superiores, principalmente, quando o solo apresentava umidades mais baixas (Figuras 7 e 8). Essa variação do comportamento mecânico com a profundidade é uma característica dos Argissolos por apresentarem granulometria mais fina em profundidades maiores, o que aumenta a coesão entre as partículas sólidas.

A mata apresentou menor σ_p e RPL, em umidades mais baixas, quando comparada com os demais tratamentos (Figuras 7 e 8). Quando as cinco áreas cultivadas com cana-de-açúcar são comparadas, não se observa uma tendência lógica do efeito do tempo e tipo de cultivo sobre σ_p e RPL do horizonte AB do Argissolo estudado, sendo que, esperava-se um comportamento semelhante ao ocorrido na camada de 0 a 20 cm.

Na profundidade de 20 a 40 cm, o solo da mata apresentou menor coeficiente linear e angular, tanto para o modelo de σ_p quanto para o de RPL, quando comparada com os tratamentos das áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Tabela 8). A maior pressão de pré-compactação das áreas cultivadas é um reflexo do histórico de pressões externas sofridas devido ao uso do solo, conforme sugerido por Dias Junior, (1994), Dias Junior e Pearce (1996), Kondo e Dias Junior (1999a), e Silva et al. (1999).

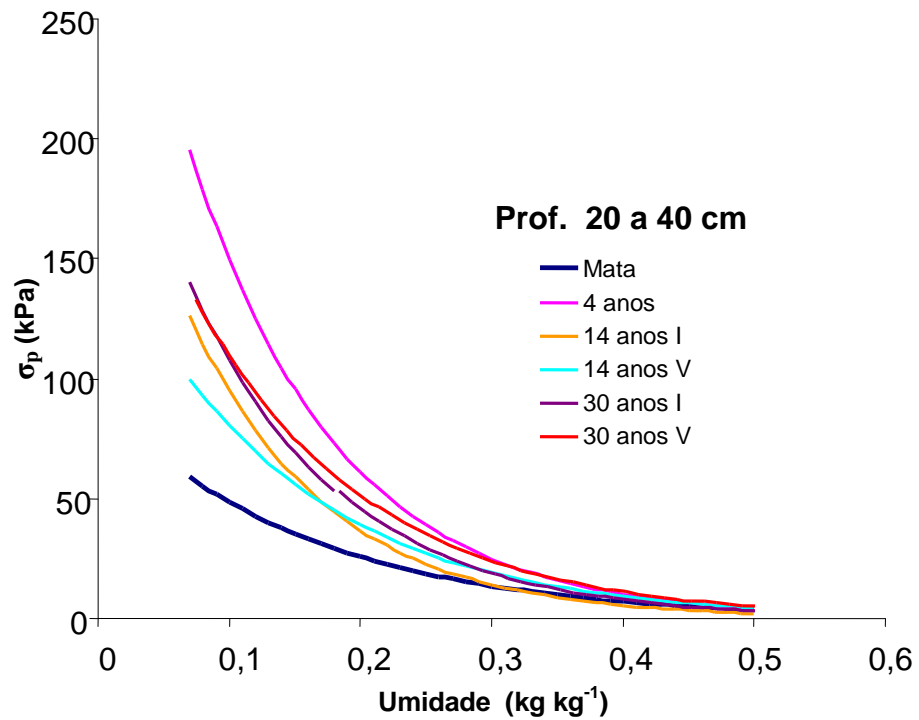


Figura 7. Curvas de pressão de pré-compactação (σ_p) em função da umidade, para os seis tratamentos na profundidade de 20 a 40 cm: $\sigma_p = 10^{(a + b.\theta g)}$.

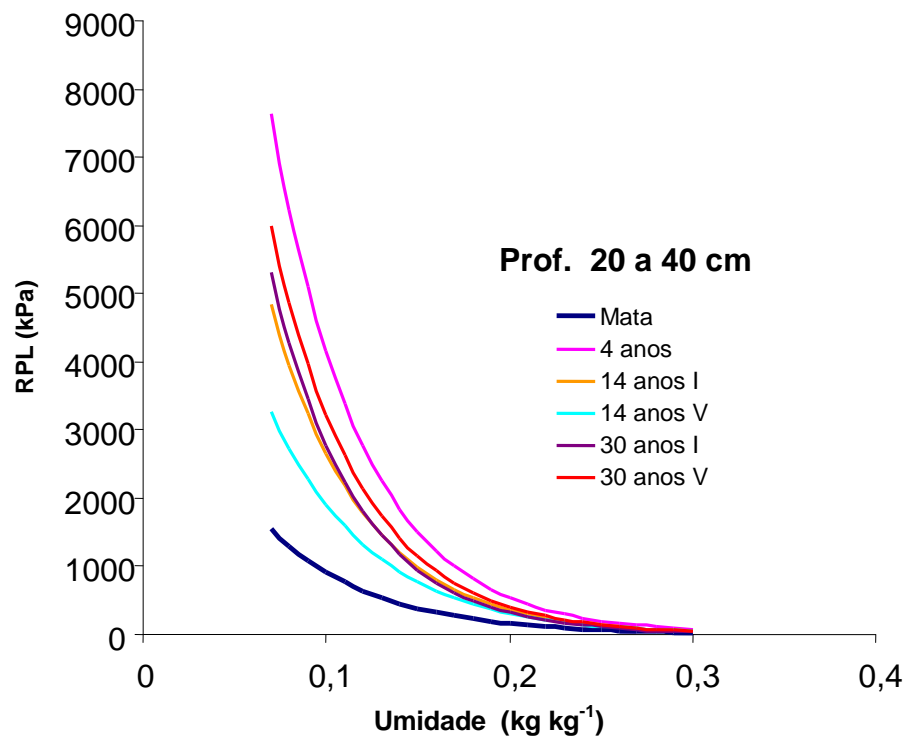


Figura 8. Curvas de resistência do solo à penetração em laboratório em função da umidade, para os seis tratamentos na profundidade de 20 a 40 cm: $RPL = 10^{(a + b.\theta g)}$.

A compactação causada por modificação no ciclo de umedecimento e secagem, tráfego de máquinas na colheita e tratos culturais, bem como, a ação dos órgãos ativos dos equipamentos de cultivo, logo nos primeiros anos de exploração com cana-de-açúcar (4 anos I), parece ter aumentado a σ_p do horizonte AB, a níveis suficientes para suportar pressões atualmente aplicadas por máquinas na Usina Coruripe.

Por mais de 18 anos o sistema de colheita com “transbordo”, que usa pneus de “alta flutuação”, pode ter contribuído para evitar compactações adicionais em camadas mais profundas do solo. Essa poderia ser uma explicação para a pequena diferença entre os coeficientes lineares e angulares das equações de σ_p e RPL dos tratamentos referente às áreas cultivadas por 14 e 30 anos, em relação à área cultivada por 4 anos (Tabela 8). Provavelmente, a maior σ_p e RPL da área de 4 anos em relação às demais áreas cultivadas, pode ser atribuída ao maior teor de argila no horizonte AB (Tabela 3). No entanto, acreditamos que essa diferença na textura não tenha comprometido a qualidade dos resultados.

Tabela 8. Coeficientes “a” e “b” das equações de regressão de σ_p e RPL em função da umidade gravimétrica para a profundidade de 20 a 40 cm.

Tratamentos	$\sigma_p = 10^{(a + b.\theta g)}$			RPL = $10^{(a + b.\theta g)}$		
	a	b	R ²	a	b	R ²
Mata	1,9695	-2,7779 **	0,6292	3,7170	-7,5570 **	0,7194
4 anos I	2,5640	-3,8919 **	0,6248	4,5003	-8,8183 **	0,5840
14 anos I	2,3894	-4,1283 **	0,6946	4,2902	-8,6598 **	0,6632
14 anos V	2,2189	-3,1337 **	0,5335	4,0623	-7,8315 **	0,6033
30 anos I	2,4146	-3,8256 **	0,6883	4,3821	-9,3790 **	0,6971
30 anos V	2,3517	-3,2666 **	0,6086	4,4046	-8,9618 **	0,6885

** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de “t”

Considerando o uso de “transbordo” e que as áreas cultivadas com cana-de-açúcar apresentavam-se no mesmo ciclo de cultivo (quarto corte), pode-se inferir que os níveis de compactação observados no horizonte AB, provavelmente, não estão sendo estabelecidos pela operação de colheita, mas

sim pelas operações de tratos culturais, onde os pneus e órgãos ativos das máquinas concentram as pressões nas entrelinhas, o que pode diminuir os efeitos da subsolagem e adubação verde a cada ciclo de cultivo.

Portanto, seria necessário um estudo para avaliar a evolução da pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração em horizontes subsuperficiais, desde a implantação da lavoura até renovação, com o objetivo de verificar a atenuação do efeito da subsolagem. Os resultados poderiam ser de grande utilidade na tomada de decisão da necessidade da operação de subsolagem, bem como, no uso da modelagem de σ_p e RPL para auxiliar na determinação do momento ideal para renovação das lavouras de cana-de-açúcar.

A pressão aplicada na superfície do solo por trânsito de máquinas, mesmo sendo transmitida de forma atenuada para horizontes mais profundos, muitas vezes é aplicada ao solo com umidades favoráveis à compactação subsuperficial, ou seja, subsolo com capacidade de suporte de carga (σ_p) menor do que a pressão aplicada durante operações mecanizadas.

A pressão média que um pneu exerce sobre a superfície do solo é aproximadamente a sua pressão de inflação (Arvidsson & Keller, 2007). A razão de carga aplicada na superfície do solo, em relação à pressão exercida a 25 cm de profundidade, é de aproximadamente 8,3:1 (Reaves & Cooper, 1960). Portanto, um pneu inflado a 120 PSI (838,2 kPa) aplica uma pressão de aproximadamente 101 kPa a 25 cm de profundidade, o que seria suficiente para ultrapassar a capacidade de suporte de carga (σ_p) do horizonte AB do Argissolo estudado, na sua condição natural (mata), mesmo para umidades muito baixas (Figura 7). Pressões de 50 a 60 kPa aplicadas ao horizonte AB da mata, contendo umidade próxima a da capacidade de campo, pode ter originado compactação, reduzindo a porosidade natural do solo da mata de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para aproximadamente $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 9). Essa compactação aumentou a σ_p e RPL das áreas cultivadas, para valores médios acima de 100 kPa e 3000 kPa, respectivamente, quando o solo nesta profundidade apresenta umidade correspondente ao ponto de murcha permanente (Tabela 9).

Tabela 9. Pressão de pré-compactação e resistência do solo a penetração em laboratório para umidade gravimétrica correspondente à saturação (θGs) e ponto de murcha permanente (\thetaGpmp), na profundidade de 20 a 40 cm.

Tratamentos	θGs (kg kg ⁻¹)	\thetaGpmp (kg kg ⁻¹)	σ_{ps} (kPa)	σ_{ppmp} (kPa)	RPLs (kPa)	RPLpmp (kPa)
Mata	0,317	0,071	12	59	21	1515
4 anos I	0,244	0,106	41	142	223	3678
14 anos I	0,244	0,082	24	112	150	3803
14 anos V	0,247	0,076	28	96	134	2932
30 anos I	0,261	0,090	26	118	86	3451
30 anos V	0,268	0,090	30	114	101	3963

Mesmo para a umidade de saturação, as áreas cultivadas apresentaram maiores σ_p e RPL em relação a mata (Tabela 9). Esse resultado demonstra o maior atrito interno entre as partículas no horizonte AB do solo das áreas cultivadas, que apresentaram densidade entre 1,53 e 1,58 Mg m⁻³ contra 1,41 Mg m⁻³ da área de mata (Tabela 10).

O horizonte coeso dos Argissolos de tabuleiros costeiros é definido por Araújo Filho et al. (1999) como uma zona do perfil com densidade maior que as outras camadas, têm consistência dura a extremamente dura quando seca, e friável quando úmida. Geralmente coincidem com os horizontes AB e/ou BA, podendo aparecer próximo à superfície, após os primeiros 10 a 20 cm de profundidade (Rezende et al., 2002).

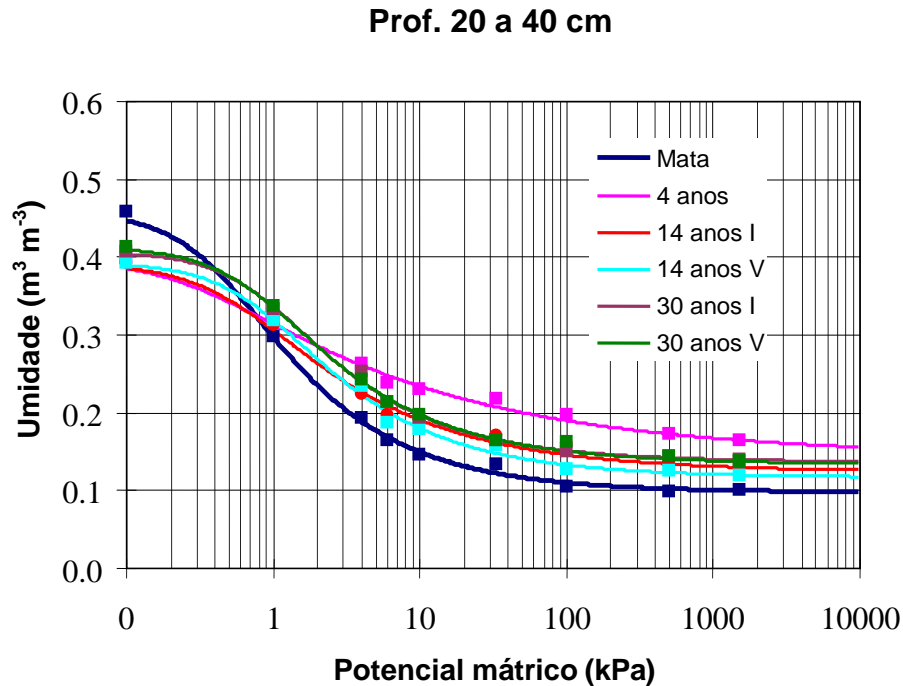


Figura 9. Curvas características de retenção de água para os seis tratamentos na profundidade de 20 a 40 cm.

As áreas estudadas apresentaram um aumento da D_s com a profundidade (Tabelas 7 e 10). Além de apresentar coesão natural, o uso do Argissolo aumentou a densidade no horizonte AB, potencializando o adensamento natural, com conseqüente aumento da sua resistência à penetração, principalmente quando o mesmo apresenta umidades mais baixas.

Na umidade do ponto de murcha permanente, o horizonte AB da mata apresentou RPL igual a 1517 kPa (Tabela 9), ou seja, inferior ao limite de 2000 kPa, considerado como limite ao desenvolvimento radicular da maioria das culturas (Blainski, 2008). Na Tabela 10, observa-se que a mata apresentou umidade muito inferior em relação às áreas cultivadas para que a RPL fosse maior ou igual a 2000 kPa (θ_{rp}). Essa característica confere ao horizonte AB da mata uma capacidade de manter baixas resistências à penetração mesmo com umidade abaixo do ponto de murcha permanente. Portanto, considerando também que a θ_{pa} foi maior que a θ_{cc} , o IHO do horizonte AB da mata é igual à água disponível, ou seja, $0,050 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 10). As áreas cultivadas apresentaram RPL bem acima de 2000 kPa na umidade de ponto de murcha

permanente, para o horizonte AB (Tabela 9). Nessas áreas, mesmo havendo umidade acima do ponto de murcha permanente para desenvolvimento de raízes, a resistência à penetração se torna restritiva ao crescimento radicular, portanto, o IHO é menor do que a AD, ou seja, é o volume de água contido entre a θ_{rp} e θ_{cc} . As áreas cultivadas apresentaram IHO variando de 0,010 a 0,026 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, que é bem inferior quando comparado com o IHO do horizonte AB do solo sob mata nativa (Tabela 10).

Tabela 10. Densidade do solo (D_s), umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (θ_{pa}), umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), umidade quando a resistência do solo a penetração é $\geq 2000 \text{ kPa}$ (θ_{rp}) e intervalo hídrico ótimo (IHO), para os seis tratamentos na profundidade de 20 a 40 cm.

Tratamentos	D_s (Mg m^{-3})	θ_{pa} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_{cc} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_{pmp} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	θ_{rp} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	IHO ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Mata	1,41	0,347	0,150	0,100	0,078	0,050
4 anos I	1,58	0,286	0,234	0,167	0,215	0,019
14 anos I	1,58	0,286	0,191	0,130	0,180	0,011
14 anos V	1,58	0,290	0,180	0,120	0,154	0,026
30 anos I	1,55	0,304	0,197	0,140	0,179	0,018
30 anos V	1,53	0,309	0,198	0,137	0,188	0,010

Segundo Cavalieri et al. (2006), o IHO aprimora o tradicional conceito de água disponível entre capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), adicionando as limitações associadas com a aeração e resistência à penetração. Nos solos em que os sistemas de manejo propiciam melhoria da sua qualidade estrutural, o IHO é numericamente igual a AD. Por outro lado, em situações de degradação estrutural, percebe-se redução na porosidade total, bem como, alterações na distribuição do tamanho dos poros. Isto implica, que valores de porosidade com ar de pelo menos $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ ocorrem em teores de água inferiores a CC, enquanto teores de água não restritivos à resistência à penetração são superiores ao ponto de murcha permanente. Nestes casos, o IHO tem seu limite superior e inferior

estabelecidos pela umidade referente porosidade de aeração (θ_{pa}) e resistência do solo à penetração ≥ 2000 kPa (θ_{rp}), respectivamente, podendo ser considerada a pior situação possível.

Considerando que as áreas cultivadas apresentaram θ_{pa} superior ao θ_{cc} , podemos inferir que o horizonte AB do Argissolo das áreas cultivadas encontra-se em uma situação intermediária de degradação, o que pode ser agravado pela combinação do caráter coeso com pressões aplicadas acima da capacidade de carga, para uma determinada umidade.

2.3 Horizonte Bt (40 a 60 cm)

Nas Figuras 10 e 11 estão representadas as curvas de regressão de pressão de pré-compactação (σ_p) e resistência do solo à penetração em laboratório (RPL), em função da umidade gravimétrica, para a profundidade de 40 a 60 cm do Argissolo das seis áreas estudadas.

Para o horizonte Bt, observa-se que os modelos de σ_p em função da umidade não apresentam tendências muito claras na diferenciação entre os tratamentos (Figura 10). Esse resultado era esperado, quando se compara o horizonte Bt com os horizontes mais superficiais. Isso provavelmente ocorre devido à atenuação das pressões aplicadas na superfície, em relação às camadas mais profundas do perfil do solo. No entanto, a curva de σ_p da mata apresentou comportamento diferenciado, cortando as curvas dos demais tratamentos (Figura 10). Na Tabela 11 podemos observar que a mata apresentou coeficientes de ajuste “a” e “b” ligeiramente inferiores, para o modelo de σ_p , quando comparada com as áreas cultivadas, indicando pequeno aumento na capacidade de suporte de carga na profundidade de 40 a 60 cm, devido ao desmatamento e mecanização das áreas para o cultivo com cana-de-açúcar.

Para RPL do horizonte Bt, a curva referente à mata ficou isolada em relação aos demais tratamentos (Figura 11), sendo que, a mata apresentou menor resistência à penetração para umidades mais baixas (Tabela 12). No entanto, as áreas cultivadas tiveram tendência de apresentar menores coeficientes angulares para os modelos de RPL em função da umidade, com exceção do tratamento 14 anos I (Tabela 11).

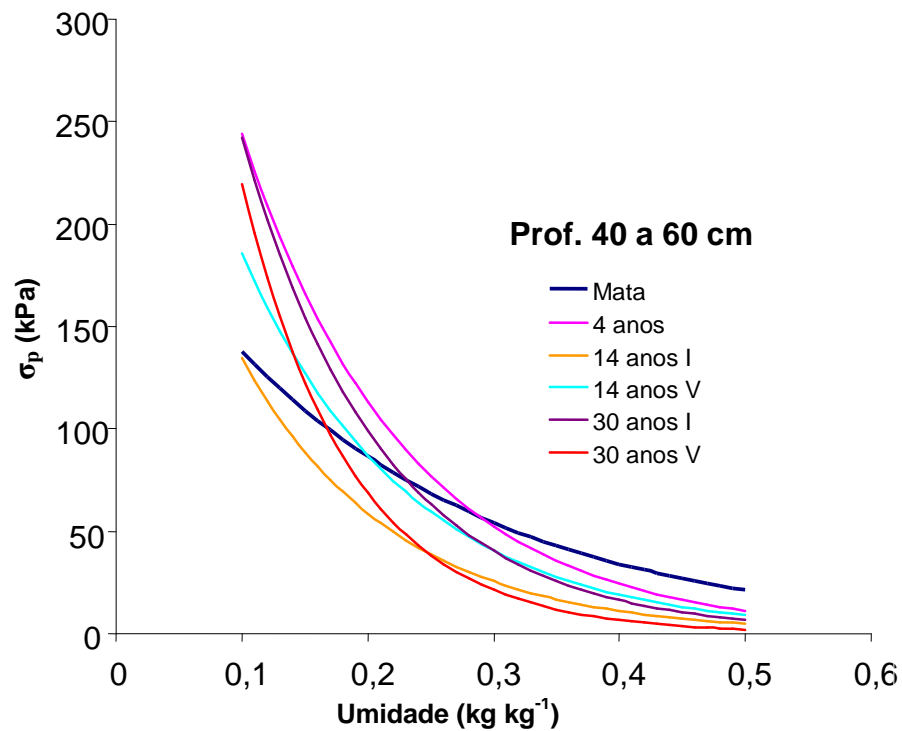


Figura 10. Curvas de pressão de pré-compactação (σ_p) em função da umidade, para os seis tratamentos na profundidade de 40 a 60 cm: $\sigma_p = 10^{(a + b \cdot \theta g)}$.

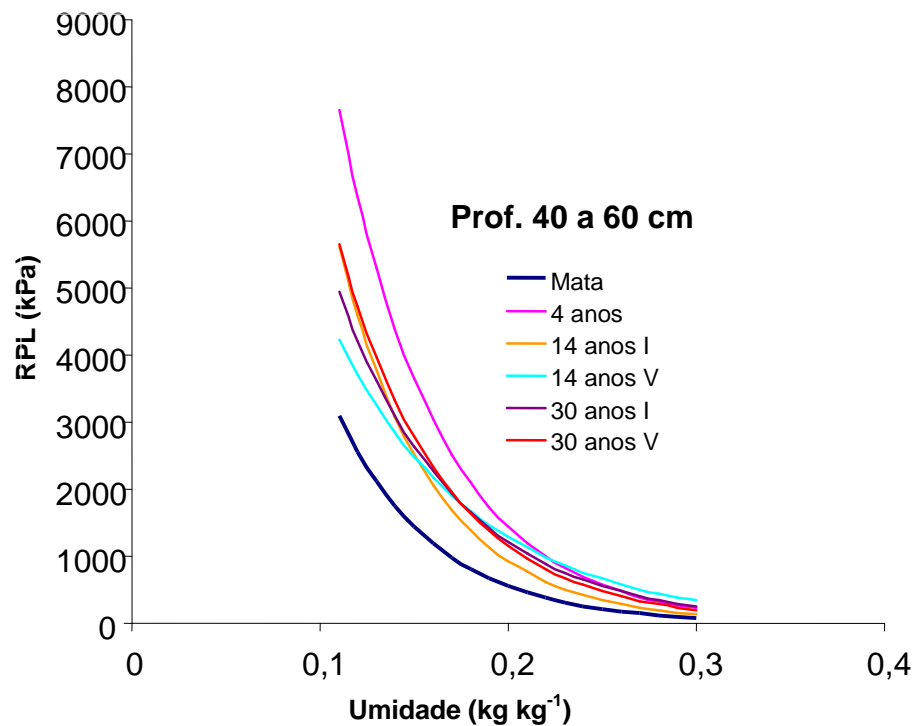


Figura 11. Curvas de resistência do solo à penetração em laboratório em função da umidade, para os seis tratamentos na profundidade de 40 a 60 cm: $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta g)}$.

O aumento da capacidade de suporte de carga (σ_p) e menor inclinação da curva de RPL são desejáveis, por conferir ao solo capacidade de suportar maiores pressões externas, sem restringir a capacidade de penetração de raízes. Esse tipo de comportamento mecânico pode ser atribuído à operação de subsolagem, que tem o objetivo de quebrar camadas compactadas devido à mecanização agrícola ou adensadas naturalmente. Segundo Rezende (2000) o subsolador é uma boa alternativa para contornar o problema da coesão, por se tratar de um implemento de preparo profundo do solo cujos órgãos ativos são hastes, que não revolvem o solo, apenas o movimentam de forma a manter sua ordem natural.

Tabela 11. Coeficientes “a” e “b” das equações de regressão de σ_p e RPL em função da umidade gravimétrica para a profundidade de 40 a 60 cm.

Tratamentos	$\sigma_p = 10^{(a + b.\theta g)}$			RPL = $10^{(a + b.\theta g)}$		
	a	b	R ²	a	b	R ²
Mata	2,3405	-3,0196 **	0,4353	4,4044	-8,3045 **	0,5815
4 anos I	2,7209	-3,3387 **	0,7133	4,7698	-8,0532 **	0,7402
14 anos I	2,4888	-3,6033 **	0,6460	4,7052	-8,6883 **	0,7889
14 anos V	2,5974	-3,2917 **	0,5446	4,2576	-5,7431 **	0,5139
30 anos I	2,7730	-3,8931 **	0,6934	4,4386	-6,7772 **	0,6724
30 anos V	2,8465	-5,0524 **	0,6655	4,5954	-7,6684 **	0,6910

** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de “t”

Efeitos favoráveis da subsolagem no ambiente de tabuleiros costeiros foram citados por Nacif (1994), que observou aumento de porosidade total e macroporosidade, menor compactação e melhor armazenamento de água no solo. Resultados convergentes foram obtidos por Xu & Mermoud (2001), observando que a subsolagem causou importante redução na densidade nos primeiros 40 cm do perfil do solo, aumento significativo do volume de macroporos e decréscimo no volume de microporos, promovendo melhoria na condutividade hidráulica do solo.

Galvão (2002), estudando os efeitos de diferentes sistemas de preparo de um Argissolo na Usina Coruripe, concluiu que a subsolagem proporcionou melhoria na compactidade do solo, aumentou a taxa de infiltração da água no solo, e proporcionou aumento na produtividade da cana-de-açúcar.

Em hipótese, esperava-se uma resistência à penetração menor no horizonte Bt das áreas cultivadas em relação à Mata, em detrimento a subsolagem. Porém, considerando que essa operação é realizada na ocasião da renovação dos canaviais e que as lavouras apresentavam-se no quarto corte, acreditamos que o efeito da operação de subsolagem já estava atenuado, devido às pressões e vibrações exercidas durante as colheitas e tratos culturais.

Tabela 12. Pressão de pré-compactação e resistência do solo a penetração em laboratório para umidade gravimétrica correspondente à saturação (θG_s) e ponto de murcha permanente (θG_{pmp}), na profundidade de 40 a 60 cm.

Tratamentos	θG_s (kg kg ⁻¹)	θG_{pmp} (kg kg ⁻¹)	σ_{ps} (kPa)	σ_{pmp} (kPa)	RPLs (kPa)	RPLpmp (kPa)
Mata	0,328	0,112	22	101	48	2981
4 anos I	0,293	0,132	55	191	259	5091
14 anos I	0,329	0,124	20	110	70	4245
14 anos V	0,292	0,129	43	149	381	3287
30 anos I	0,290	0,136	44	175	297	3288
30 anos V	0,320	0,135	17	146	139	3632

Por meio da análise da curva característica de retenção de água (Figura 12), podemos observar que o horizonte Bt do solo da Mata apresentou porosidade total similar aos demais tratamentos, bem como, pequena diferença na D_s (Tabela 13). No entanto, as áreas cultivadas apresentaram maior retenção de água a partir de tensões superiores à -4 kPa, ou seja, maior porcentagem de microporos. A maior inflexão da curva característica da mata representa uma maior porcentagem de macroporos na profundidade de 40 a 60 cm para esse tratamento, em relação às áreas cultivadas (Figura 12). Portanto, a distribuição do tamanho de poros pode explicar a maior compressibilidade do

horizonte Bt do solo da mata em umidades mais baixas (Tabela 12), bem como, menor umidade para que resistência do solo à penetração seja ≥ 2000 kPa (Tabela 13), quando comparada com as áreas cultivadas.

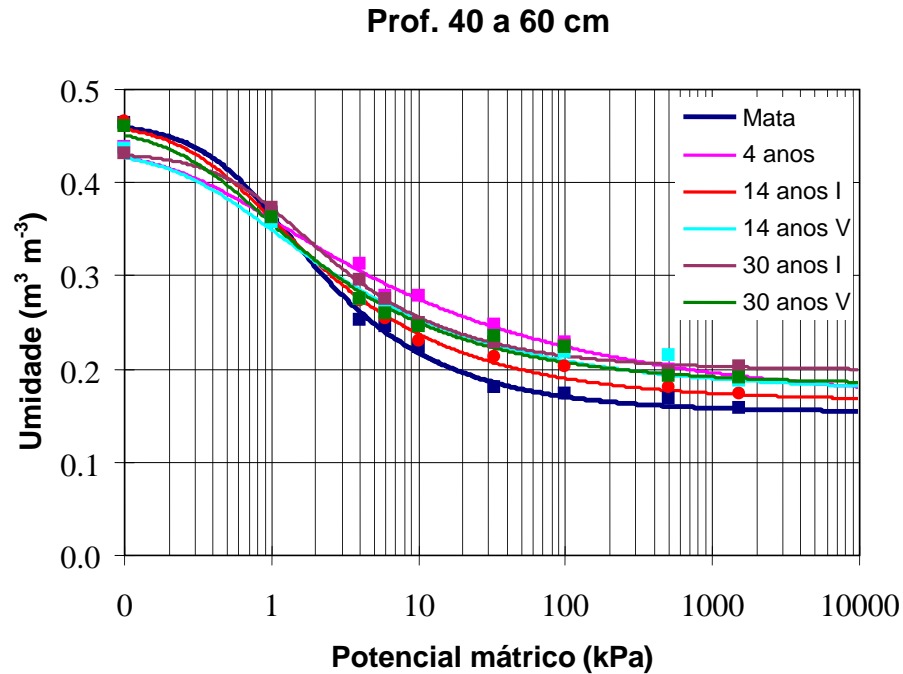


Figura 12. Curvas características de retenção de água para os seis tratamentos na profundidade de 40 a 60 cm.

Por apresentarem θ_{rp} maior do que θ_{mp} , os seis tratamentos tiveram o IHO definidos entre os limites superiores e inferiores igual ao θ_{cc} e θ_{rp} , respectivamente, tendo seus valores de IHO inferiores a AD (Tabela 13). Para as áreas cultivadas, a umidade que restringe a penetração de raízes (θ_{rp}) ficou muito próximo a umidade de capacidade de campo (θ_{cc}), conseqüentemente, esses tratamentos apresentaram IHO, aproximadamente, três vezes menor do que o horizonte Bt do Argissolo sob mata nativa.

Esse resultado demonstra que a capacidade de suporte de carga de horizontes mais profundos deve ser determinada para que pressões não sejam aplicadas em umidades que venham a favorecer a reversão dos efeitos desejáveis da subsolagem. Dessa forma, as lavouras de cana-de-açúcar poderão desenvolver sistema radicular mais profundo por um período mais longo, favorecendo a maior longevidade e produtividade de canaviais em Argissolos de tabuleiros costeiros.

Tabela 13. Densidade do solo (D_s), umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{pa}), umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), umidade quando a resistência do solo a penetração é $\geq 2000 \text{ kPa}$ (θ_{rp}) e intervalo hídrico ótimo (IHO), para os seis tratamentos na profundidade de 40 a 60 cm.

Tratamentos	D_s (Mg m^{-3})	θ_{pa} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{cc} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{pmp} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{rp} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	IHO ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
Mata	1,40	0,359	0,217	0,157	0,186	0,031
4 anos I	1,46	0,327	0,275	0,193	0,266	0,009
14 anos I	1,39	0,358	0,238	0,173	0,225	0,013
14 anos V	1,46	0,327	0,254	0,188	0,243	0,011
30 anos I	1,48	0,329	0,257	0,202	0,248	0,009
30 anos V	1,41	0,351	0,250	0,190	0,238	0,012

3 – Correlações lineares da pressão de pré-compactação e da resistência mecânica à penetração com atributos físicos e matéria orgânica do solo.

A seguir serão apresentados os resultados das análises de trilha com determinação dos coeficientes de correlação linear, para desdobramento dos efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica do solo sobre a pressão de pré-compactação média (σ_{pm}) e resistência do solo à penetração em laboratório média (RPLm), para as três profundidades do Argissolo estudado.

3.1 Horizonte A ou Ap (0 a 20 cm)

Os coeficientes de correlação, de trilha e dos efeitos indiretos das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo estudado sobre a σ_{pm} , na profundidade de 0 a 20 cm, são apresentados na Tabela 14.

O conjunto de variáveis selecionado explicou 89,0% (R^2) das variações na pressão de pré-compactação e apresentaram colinearidade fraca. As variáveis que apresentaram coeficiente de correlação (efeito total) significativo ao nível de 1% de probabilidade, com a σ_{pm} podem ser classificadas na

seguinte ordem decrescente: GC>%AGR>MOT>%MOP. O GC teve correlação positiva e, as demais variáveis, correlação negativa com a variável dependente. Esse resultado indica que o aumento do GC aumentou a capacidade de suporte de carga do solo (σ_p) e que, o aumento da estabilidade de agregados e matéria orgânica favoreceu a maior compressibilidade na profundidade de 0 a 20 cm do Argissolo estudado.

Tabela 14. Desdobramento das correlações lineares em efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a σ_{pm} para a profundidade de 0 a 20 cm.

Variáveis	S+A	MOT	%MOP	%AGR	Vmicro	GC	Total
S+A	-0,270	0,038	0,000	0,108	-0,129	0,298	0,045
MOT	0,050	-0,197	0,051	-0,289	0,091	-0,390	-0,684**
%MOP	-0,003	-0,133	0,075	-0,246	0,038	-0,400	-0,669**
%AGR	0,087	-0,170	0,055	-0,334	0,102	-0,451	-0,711**
Vmicro	0,151	-0,078	0,012	-0,147	0,231	-0,181	-0,012
GC	-0,113	0,107	-0,042	0,211	-0,058	0,713	0,818**
Coeficiente de Determinação (R^2)							0,890
Efeito da Variável Residual (ρ_ϵ)							0,331
Colinearidade							Fraca

** correlação de Pearson significativa a 1% de probabilidade, para o efeito total;

- Leitura dos efeitos diretos (coeficiente de trilha) sobre a variável resposta na diagonal, em negrito, e dos efeitos indiretos na horizontal;

- S+A = silte mais argila; MOT = matéria orgânica total; %MOP = porcentagem de matéria orgânica particulada; %AGR = porcentagem de agregação em água; Vmicro = volume de microporos e GC = grau de compactação.

As seguintes propriedades têm sido associadas aos efeitos da análise de trilha: a) sendo um coeficiente de regressão ele tem direção, podendo ser positivo ou negativo e maior ou menor do que a unidade; b) sendo um coeficiente de regressão padronizado, ele pode ser utilizado para comparar efeito de caracteres mensuráveis em diferentes escalas; c) não tendo unidade física, ele se assemelha a um coeficiente de correlação (Cruz et al., 2004). Essa observação permite que os coeficientes de trilha (efeitos diretos) possam ser comparados entre si e com o efeito da variável residual, que é utilizado como referencial para a importância do efeito direto das variáveis explicativas

sobre a variável principal ou dependente. Quando o coeficiente de trilha (efeito direto) de uma variável explicativa for, em módulo, menor do que o coeficiente da variável residual ($\rho\epsilon$), mas o coeficiente de correlação (efeito total) for maior, em módulo, do que o efeito da variável residual significa que, essa variável explicativa tem efeito sobre a variável principal apenas indiretamente, sendo sua importância só em conjunto. Se o coeficiente de trilha for, em módulo, maior do que o coeficiente da variável residual ($\rho\epsilon$) indica que, existe efeito direto da variável explicativa sobre a principal (Cruz et al., 2004).

Variáveis que apresentam coeficiente de trilha com mesmo sinal e magnitude do coeficiente de correlação são determinantes do comportamento da variável dependente. No entanto, quando uma variável explicativa apresenta coeficiente de trilha com sinal contrário ao do coeficiente de correlação significa que, essa variável não apresenta relação causa efeito direto com a variável principal, devendo ser considerados somente seus efeitos indiretos em conjunto com outras variáveis (Gomes, 1996).

Somente o GC e a %AGR apresentaram coeficiente de trilha maior do que o efeito da variável residual e com mesmo sinal do efeito total, indicando a importância da relação causa e efeito dessas duas variáveis com a σ_{pm} (Tabela 14). A variável GC foi a mais importante no efeito direto sobre a σ_{pm} , pois apresentou o maior coeficiente de trilha com mesmo sinal e magnitude semelhante a do efeito total. A %AGR teve coeficiente de trilha com magnitude muito inferior a do efeito total, indicando sua menor importância na relação de causa e efeito direto com a σ_{pm} .

As variáveis %AGR, MOT e %MOP apresentaram coeficientes de correlação para efeito indireto, via GC, igual a -0,451, -0,390 e -0,400, respectivamente (Tabela 14). Em módulo, esses coeficientes são maiores do que o efeito residual (0,331), indicando que a matéria orgânica e a estabilidade de agregados favoreceram ao menor grau de compactação do solo e, conseqüentemente, sua maior compressibilidade.

Os efeitos totais, diretos e indiretos das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo estudado sobre a RPLm, na profundidade de 0 a 20 cm, estão apresentados na Tabela 15.

O conjunto de variáveis selecionado explicou 90,4% (R^2) das variações na resistência à penetração e apresentaram colinearidade fraca.

As variáveis que superaram o efeito da variável residual, em ordem decrescente para coeficiente de correlação (efeito total), foram GC>MOT>%AGR, apresentando significância ao nível de 1% de probabilidade. A grande importância da relação causa e efeito do GC e da MOT, com a RPL do horizonte superficial do Argissolo, é expressa pelos coeficientes de trilha de mesmo sinal e magnitude semelhante aos apresentados pelos coeficientes de correlação, sendo que ao GC pode ser considerada a variável explicativa mais importante, por apresentar o maior coeficiente de trilha (Tabela 15).

Mesmo apresentando efeito total significativo, a %AGR não apresentou relação causa e efeito com a variável dependente, pois seu coeficiente de trilha apresentou sinal contrário ao do coeficiente de correlação. No entanto, seu efeito indireto via GC maior do que o efeito da variável residual confirma a importância da agregação do solo sobre a diminuição do grau de compactação e, conseqüentemente, sobre a menor resistência do solo à penetração de raízes.

Tabela 15. Desdobramento das correlações lineares em efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a resistência do solo à penetração em laboratório média (RPL_m) para a profundidade de 0 a 20 cm.

Variáveis	S+A	MOT	%AGR	Vmicro	GC	Total
S+A	-0,258	0,125	-0,105	-0,180	0,321	-0,097
MOT	0,048	-0,674	0,280	0,127	-0,419	-0,638**
%AGR	0,084	-0,583	0,323	0,142	-0,485	-0,591**
Vmicro	0,145	-0,266	0,143	0,321	-0,194	0,149
GC	-0,108	0,369	-0,205	-0,082	0,767	0,741**
Coeficiente de Determinação (R ²)						0,904
Efeito da Variável Residual (ρ _ε)						0,310
Colinearidade						Fraca

** correlação de Pearson significativa a 1% de probabilidade, para o efeito total;

- Leitura dos efeitos diretos (coeficiente de trilha) sobre a variável resposta na diagonal, em negrito, e dos efeitos indiretos na horizontal;

- S+A = silte mais argila; MOT = matéria orgânica total; %AGR = porcentagem de agregação em água; Vmicro = volume de microporos e GC = grau de compactação.

Na profundidade de 0 a 20 cm a mata apresentou teores de MOT de $17,80 \text{ g kg}^{-1}$, que relativamente, foi bem superior aos teores das áreas cultivadas, que variaram de $8,72$ a $11,54 \text{ g kg}^{-1}$. A cana-de-açúcar é considerada uma cultura que muito contribui com o acúmulo de carbono orgânico no solo. No entanto, o sistema de colheita de cana queimada, combinado com tratamentos culturais que movimentam o solo excessivamente nas entrelinhas, pode ter contribuído para a redução do teor de MOT, que é um dos principais fatores responsáveis na formação de agregados na camada superficial do solo, que apresentou $84,1 \%$ de agregação na mata contra uma variação de $22,36$ a $35,11 \%$ de agregação nas áreas cultivadas (Tabela 16).

Segundo Horn et al. (1993), a resistência do solo ao cisalhamento tende a aumentar com o desenvolvimento da estrutura. Entretanto, D'Agostini et al. (1992) argumenta que solos recuperados por processos biológicos, em que as condições estruturais se aproximam das naturais, tendem a apresentar condições de elevada compressibilidade (baixa σ_p), uma vez que, a agregação é acompanhada de um aumento da porosidade, em especial da macroporosidade. Um solo que apresenta macroporosidade elevada é mais compressível, porque apresenta menor número de pontos de contato entre partículas sólidas para conferir resistência mecânica à pressão compressiva imposta a ele. Portanto, a matéria orgânica apresenta efeitos contraditórios sobre a resistência do solo à compactação: a) aumento da força de ligação entre as partículas minerais e b) mudança no arranjo das partículas (porosidade) (Horn & Libert, 1994).

O balanço entre esses dois efeitos, que por sua vez depende da origem e estado de decomposição da matéria orgânica, irão determinar o efeito sobre a resistência do solo. De fato, a matéria orgânica pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, parâmetros de cisalhamento, tensão capilar e grau de saturação de água (Zhang et al., 1997).

Quando predominam os efeitos de redução da densidade, por aumento da porosidade, a resistência à compressão diminui. Entretanto, a matéria orgânica produz aumento na resistência do solo à compressão, quando predomina o efeito de aumento dos parâmetros de cisalhamento, aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente e redução do efeito da água

na redução da fricção entre partículas, redução da densidade por efeito de diluição e aumento da elasticidade.

Tabela 16. Pressão de pré-compactação média, resistência do solo à penetração em laboratório média, atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo dos seis tratamentos na profundidade de 0 a 20 cm.

Variáveis	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
$\sigma_{p,m}$ (kPa)	19	28	29	36	39	40
RPLm (kPa)	186	356	310	414	477	699
S+A (g kg ⁻¹)	132	133	134	127	115	132
MOT (g kg ⁻¹)	17,80	9,39	11,54	10,84	9,97	8,72
%MOP	22,44	15,28	15,71	16,65	15,31	11,27
%MOC	77,56	84,72	84,29	83,35	84,69	88,73
%AGR	84,10	34,67	35,11	31,69	22,36	31,26
%AEA	90,88	63,80	63,09	67,31	59,49	64,64
DMP (mm)	2,36	0,84	0,79	0,95	0,64	0,79
VTP (m ³ m ⁻³)	0,53	0,47	0,47	0,47	0,45	0,44
%MICRO	33,18	32,58	34,75	34,14	35,41	36,11
%MACRO	66,82	67,42	65,25	65,86	64,59	63,89
Ds (Mg m ⁻³)	1,21	1,38	1,37	1,39	1,44	1,46
GC (%)	71,44	72,60	74,07	75,12	77,09	77,15

$\sigma_{p,m}$ = pressão de pré-compactação média, RPLm = resistência do solo à penetração em laboratório média, S+A = silte mais argila, MOT = matéria orgânica total, %MOP = % de matéria orgânica particulada, %MOC = % de matéria orgânica complexada, %AGR = % de agregação em água, %AEA = % de agregados estáveis em água, DMP = diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água, VTP = volume total de poros, %MICRO = % de microporos, %MACRO = % de macroporos, Ds = densidade do solo e GC = grau de compactação.

O maior teor de matéria orgânica e agregação do horizonte superficial do solo da mata, também conferiram a esse tratamento maior VTP, menor Ds e menor GC, em relação às áreas cultivadas. A modificação desses atributos, com o cultivo com a cana-de-açúcar, teve efeitos diretos e indiretos sobre o comportamento mecânico do Argissolo estudado, conferindo ao mesmo uma tendência no aumento da pressão de pré-compactação e resistência à penetração com o tempo de uso (Tabela 16). Ainda observa-se uma tendência de maior pressão de pré-compactação e resistência à penetração das áreas sob cultivo de verão, em relação às de inverno, para 14 e 30 anos de uso.

Esse fato parece ser relacionado com a maior movimentação do horizonte Ap no sistema de cultivo de verão e, cultivo de leguminosas nas áreas de inverno que também apresentaram uma tendência de maior teor de MOT e menor Ds.

3.2 Horizonte AB (20 a 40 cm)

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da análise de trilha, com desdobramento dos efeitos diretos e indiretos de atributos de física do solo e matéria orgânica sobre a pressão de pré-compactação do horizonte AB. O conjunto de variáveis selecionado explicou 87,2 % (R^2) das variações na σ_{pm} e apresentaram colinearidade fraca.

Tabela 17. Desdobramento das correlações lineares em efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a pressão de pré-compactação média (σ_{pm}) para a profundidade de 20 a 40 cm.

Variáveis	S+A	MOT	%MOP	%AGR	DMP	Ds	Total
S+A	0,362	-0,007	0,003	-0,007	0,101	0,085	0,724**
MOT	0,082	-0,036	-0,004	0,029	-0,085	-0,165	-0,115
%MOP	-0,095	-0,011	-0,013	0,022	-0,120	-0,179	-0,466*
%AGR	-0,046	-0,020	-0,006	0,051	-0,184	-0,333	-0,515**
DMP	-0,172	-0,015	-0,007	0,044	-0,212	-0,356	-0,785**
Ds	0,070	0,014	0,005	-0,039	0,172	0,440	0,688**
Coeficiente de Determinação (R^2)							0,872
Efeito da Variável Residual ($\rho\epsilon$)							0,358
Colinearidade							Fraca

* correlação de Pearson significativa a 5% de probabilidade, para o efeito total;

** correlação de Pearson significativa a 1% de probabilidade, para o efeito total;

- Leitura dos efeitos diretos (coeficiente de trilha) sobre a variável resposta na diagonal, em negrito, e dos efeitos indiretos na horizontal;

- S+A = silte mais argila; MOT = matéria orgânica total; %MOP = porcentagem de matéria orgânica particulada; %AGR = porcentagem de agregação em água; DMP = diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água; Ds = densidade do solo e UC = umidade crítica.

Nessa profundidade as variáveis DMP, %AGR e %MOP apresentaram coeficientes de correlação significativos e negativos com a $\sigma_p m$. Essas variáveis foram pouco importantes na relação causa e efeito com a variável principal, por apresentarem coeficiente de trilha e de efeitos indiretos inferiores ao efeito da variável residual (Tabela 17). No entanto, o DMP e a %AGR apresentaram coeficiente de efeito indireto, via Ds, bem próximo do valor do efeito da variável residual, indicando que mesmo para profundidades abaixo de 20 cm, a agregação do Argissolo tende a ter importância sobre relação causa e efeito com sua qualidade estrutural, ou seja, maior compressibilidade devido à menor compactação.

As variáveis explicativas S+A e Ds apresentaram coeficiente de correlação significativo com sinal positivo, sendo que a densidade do solo foi a variável mais importante na relação causa efeito com a pressão de pré-compactação, apresentando coeficiente de trilha superior ao da variável explicativa S+A (Tabela 17).

Os efeitos totais das variáveis explicativas sobre a RPLm foram similares aos resultados obtidos para $\sigma_p m$. O conjunto de variáveis selecionado explicou 84,7% (R^2) das variações na RPLm e apresentaram colinearidade fraca (Tabela 18).

A Ds foi a variável mais importante e também a única que apresentou coeficiente de trilha com valor superior ao do efeito da variável residual, confirmando seu efeito direto, com mesmo sinal, sobre a resistência à penetração do Argissolo na profundidade de 20 a 40 cm (Tabela 18). A %AEA apresentou coeficiente do efeito indireto, via Ds, superior ao efeito da variável residual e, com sinal negativo, indicando que o seu aumento implica em diminuição da resistência do solo à penetração, reforçando a importância dessa variável na avaliação da condição estrutural do solo.

Por serem duas variáveis dependentes da umidade do solo, existe uma relação positiva e linear entre pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração (Lima et al., 2006). Isso explica os resultados similares da dependência dessas variáveis em relação à qualidade estrutural do solo. Machado et al. (2008) verificaram que a intensificação do uso resultou no aumento da densidade do solo, e que essas modificações explicaram mudanças no comportamento da curva característica de retenção de água.

Tabela 18. Desdobramento das correlações lineares em efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a resistência do solo à penetração em laboratório média (RPLm) para a profundidade de 20 a 40 cm.

Variáveis	S+A	MOT	%AEA	Ds	GC	Total
S+A	0,339	0,013	0,123	0,114	-0,020	0,569**
MOT	0,077	0,056	-0,172	-0,222	0,030	-0,231
%AEA	-0,116	0,026	-0,359	-0,395	0,053	-0,791**
Ds	0,065	-0,021	0,240	0,591	-0,104	0,771**
GC	0,060	-0,015	0,168	0,547	-0,113	0,647**
Coeficiente de Determinação (R^2)						0,847
Efeito da Variável Residual ($\rho\epsilon$)						0,391
Colinearidade						Fraca

** correlação de Pearson significativa a 1% de probabilidade, para o efeito total;

- Leitura dos efeitos diretos (coeficiente de trilha) sobre a variável resposta na diagonal, em negrito, e dos efeitos indiretos na horizontal;

- S+A = silte mais argila; MOT = matéria orgânica total; %AEA = porcentagem de agregados estáveis em água; Ds = densidade do solo e GC = grau de compactação.

Segundo Lebert & Horn (1991) a densidade afeta o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, ou seja, o número de pontos de contato entre as mesmas, sendo que para um mesmo material o atrito é tanto maior quanto maior for a densidade. A água também afeta o ângulo de atrito interno por constituir-se em um agente lubrificante entre as partículas sólidas. A adição de água ao solo resulta na formação de filmes de moléculas de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas.

Portanto, a modificação na distribuição da porosidade do solo pode somar o efeito do arranjo espacial das partículas sólidas com o comportamento hídrico, causando grandes modificações no atrito entre as partículas, e conseqüentemente, na pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração.

No horizonte AB a variação nos teores de matéria orgânica entre as áreas estudadas foi muito pequena, sendo que, a mata teve uma leve tendência de apresentar maior teor de MOT e maior %MOP (Tabela 19).

Por se tratar de um horizonte localizado abaixo da profundidade de preparo do solo, a dinâmica da matéria orgânica é menos influenciada pela retirada da vegetação nativa e introdução da cana-de-açúcar. No entanto, pressões aplicadas pelas extremidades dos órgãos ativos dos implementos de preparo do solo e cultivo, sobre as camadas adjacentes, podem causar compactação subsuperficial, aumentando sua densidade e diminuindo o volume total de poros, principalmente, pela deformação da macroporosidade.

Tabela 19. Pressão de pré-compactação média, resistência do solo à penetração em laboratório média, atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo dos seis tratamentos na profundidade de 20 a 40 cm.

Variáveis	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
σ_{pm} (kPa)	50	99	82	77	88	88
RPLm (kPa)	1114	2289	2412	2178	2215	2423
S+A (g kg ⁻¹)	207	299	250	232	253	276
MOT (g kg ⁻¹)	8,74	8,33	8,28	7,73	7,46	7,45
%MOP	7,51	5,03	5,79	5,71	4,42	3,66
%MOC	92,49	94,97	94,21	94,29	95,58	96,34
%AGR	66,41	43,90	34,23	32,05	36,98	29,90
%AEA	85,20	70,84	65,38	69,76	68,23	60,01
DMP (mm)	1,73	0,67	0,59	0,78	0,68	0,53
VTP (m ³ m ⁻³)	0,45	0,39	0,39	0,39	0,40	0,41
%MICRO	37,76	64,41	54,17	51,66	53,90	53,48
%MACRO	62,24	35,59	45,83	48,34	46,10	46,52
Ds (Mg m ⁻³)	1,41	1,58	1,58	1,58	1,55	1,53
GC (%)	73,49	81,17	79,49	81,35	78,21	78,32

σ_{pm} = pressão de pré-compactação média, RPLm = resistência do solo à penetração em laboratório média, S+A = silte mais argila, MOT = matéria orgânica total, %MOP = % de matéria orgânica particulada, %MOC = % de matéria orgânica complexada, %AGR = % de agregação em água, %AEA = % de agregados estáveis em água, DMP = diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água, VTP = volume total de poros, %MICRO = % de microporos, %MACRO = % de macroporos, Ds = densidade do solo e GC = grau de compactação.

Na Tabela 19 observa-se que as áreas cultivadas apresentaram maior Ds e menor VTP, sendo que, a mata apresentou maior estabilidade de agregados, maior %MACRO e menor %MICRO em relação às áreas cultivadas.

Esses resultados comprovam a importância do efeito desses atributos físicos sobre o comportamento mecânico do horizonte AB do Argissolo estudado, que apresentou maior σ_{pm} e RPL quando submetido ao cultivo com cana-de-açúcar (Tabela 19). Entretanto, praticamente não se observou diferença entre as áreas submetidas a diferentes tipos e tempo de cultivo, indicando que o sistema de exploração canavieira adotado pela Usina Coruripe, não tem causado compactações adicionais na profundidade de 20 a 40 cm, a partir dos primeiros anos de cultivo.

3.3 Horizonte Bt (40 a 60 cm)

Nas Tabelas 20 e 21 são apresentados os resultados dos desdobramentos das correlações dos atributos físicos e matéria orgânica com a pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração em laboratório, para a profundidade de 40 a 60 cm. O conjunto de variáveis independentes selecionado apresentou colinearidade fraca e explicaram 74,1 e 58,9% do comportamento da σ_{pm} e RPLm, respectivamente.

A densidade do solo e o grau de compactação apresentaram coeficiente de correlação significativo e positivo com a σ_{pm} do horizonte Bt (Tabela 20). Não foi observada nenhuma correlação entre atributos referentes à agregação e teores de matéria orgânica do solo com a pressão de pré-compactação e resistência do solo à penetração.

O GC foi a variável mais importante na relação causa e efeito com a σ_{pm} , apresentando coeficiente de trilha maior do que o efeito da variável resíduo e, com mesmo sinal e magnitude muito similar ao coeficiente do efeito total (Tabela 20). A Ds não apresentou importância no efeito direto sobre a σ_{pm} , porém, apresentou grande efeito indireto via o grau de compactação, indicando também a importância dessa variável explicativa sobre as alterações na σ_{pm} .

Tabela 20. Desdobramento das correlações lineares em efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a pressão de pré-compactação média (σ_{pm}) para a profundidade de 40 a 60 cm.

Variáveis	S+A	MOT	%AGR	Ds	GC	Total
S+A	0,259	0,002	0,004	-0,074	-0,367	-0,176
MOT	0,040	0,009	0,009	-0,036	-0,158	-0,136
%AGR	0,047	0,004	0,023	-0,033	-0,063	-0,022
Ds	-0,143	-0,002	-0,007	0,134	0,780	0,762**
GC	-0,115	-0,002	-0,002	0,127	0,824	0,832**
Coeficiente de Determinação (R^2)						0,741
Efeito da Variável Residual ($\rho\epsilon$)						0,509
Colinearidade						Fraca

** correlação de Pearson significativa a 1% de probabilidade, para o efeito total;

- Leitura dos efeitos diretos (coeficiente de trilha) sobre a variável resposta na diagonal, em negrito, e dos efeitos indiretos na horizontal;

- S+A = silte mais argila; MOT = matéria orgânica total; %AGR = porcentagem de agregação em água; Ds = densidade do solo e GC = grau de compactação.

Nenhuma das variáveis explicativas selecionadas para a análise de trilha apresentou coeficiente de correlação significativo com a RPLm, ou seja, todas variáveis independentes apresentaram efeito total menor do que o efeito da variável residual (Tabela 21). No entanto a Ds apresentou efeito direto e o GC efeito indireto, via Ds, maiores do que o efeito da variável residual, indicando a importância da correlação causa e efeito dessas duas variáveis com a RPLm do horizonte Bt.

Tabela 21. Desdobramento das correlações lineares em efeitos diretos e indiretos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a resistência do solo à penetração em laboratório média (RPLm) para a profundidade de 40 a 60 cm.

Variáveis	S+A	MOT	%MOP	%AGR	Ds	GC	Total
S+A	0,486	-0,065	0,001	0,014	-0,438	0,043	0,041
MOT	0,075	-0,420	-0,002	0,033	-0,213	0,019	-0,508
%MOP	-0,077	-0,125	-0,006	0,018	-0,113	0,019	-0,284
%AGR	0,089	-0,186	-0,001	0,074	-0,194	0,007	-0,211
Ds	-0,268	0,112	0,001	-0,018	0,793	-0,091	0,529
GC	-0,216	0,081	0,001	-0,006	0,750	-0,097	0,513
Coeficiente de Determinação (R ²)							0,589
Efeito da Variável Residual (ρ _ε)							0,641
Colinearidade							Fraca

- Leitura dos efeitos diretos (coeficiente de trilha) sobre a variável resposta na diagonal, em negrito, e dos efeitos indiretos na horizontal;

- S+A = silte mais argila; MOT = matéria orgânica total; %MOP = porcentagem de matéria orgânica particulada; %AGR = porcentagem de agregação em água; Ds = densidade do solo e GC = grau de compactação.

Na Tabela 22, pode-se observar um pequeno aumento na $\sigma_{p,m}$ e na RPLm no horizonte Bt das áreas cultivadas em relação à mata, sendo que, as áreas cultivadas não apresentaram uma variação lógica entre elas, que poderia relacionar compactação dessa camada com o tempo ou tipo de cultivo. Porém, pode-se inferir que o sistema de cultivo com cana-de-açúcar teve pequeno efeito sobre a compactação na profundidade de 40 a 60 cm.

Tabela 22. Pressão de pré-compactação média, resistência do solo à penetração em laboratório média, atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo dos seis tratamentos na profundidade de 40 a 60 cm.

Variáveis	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
$\sigma_{p,m}$ (kPa)	86	131	85	113	131	103
RPLm (kPa)	1991	2598	2509	2243	2249	2261
S+A (g kg ⁻¹)	369	404	408	394	392	407
MOT (g kg ⁻¹)	8,12	7,62	6,49	7,84	7,06	7,21
%MOP	8,54	5,37	5,60	6,26	5,72	5,99
%MOC	91,46	94,63	94,40	93,74	94,28	94,01
%AGR	68,33	62,75	54,79	65,03	59,96	59,12
%AEA	84,70	74,08	74,38	84,72	79,80	78,12
DMP (mm)	1,41	1,21	0,77	1,25	1,01	0,89
VTP (m ³ m ⁻³)	0,46	0,43	0,46	0,43	0,43	0,45
%MICRO	52,08	68,10	56,12	63,25	63,89	59,17
%MACRO	47,92	31,90	43,88	36,75	36,11	40,83
Ds (Mg m ⁻³)	1,40	1,46	1,39	1,46	1,48	1,41
GC (%)	72,98	77,78	73,19	78,10	77,95	75,03

$\sigma_{p,m}$ = pressão de pré-compactação média, RPLm = resistência do solo à penetração em laboratório média, S+A = silte mais argila, MOT = matéria orgânica total, %MOP = % de matéria orgânica particulada, %MOC = % de matéria orgânica complexada, %AGR = % de agregação em água, %AEA = % de agregados estáveis em água, DMP = diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água, VTP = volume total de poros, %MICRO = % de microporos, %MACRO = % de macroporos, Ds = densidade do solo e GC = grau de compactação.

4 – Avaliação da qualidade do argissolo por meio da ordenação multidimensional (MNS) de atributos físicos e matéria orgânica.

4.1 Horizonte A ou Ap (0 a 20 cm)

A Figura 13 representa a variabilidade da qualidade do solo de cada ponto amostral, na profundidade de 0 a 20 cm, por meio da análise ordenação multivariada ou “Nonmetric Multidimensional Scaling” (NMS), que correlacionou as variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo com os escores das amostras no espaço destas variáveis.

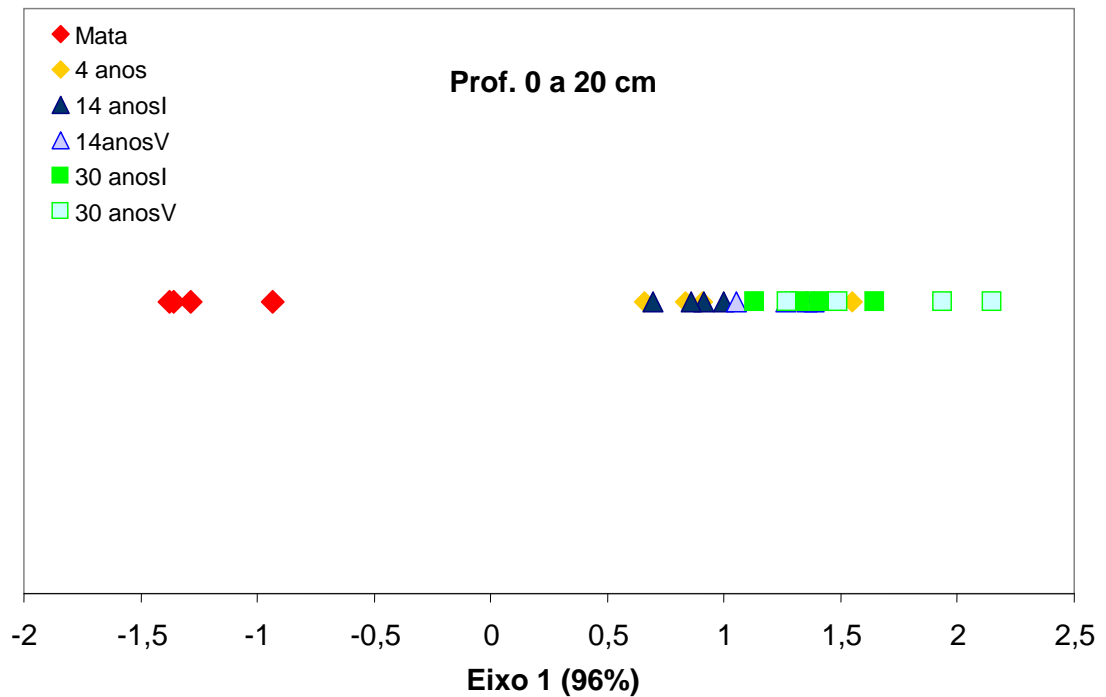


Figura 13. Gráfico de ordenação multidimensional das amostras no espaço das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo, para profundidade de 0 a 20 cm.

Nessa profundidade, 96% da variabilidade da qualidade do solo, entre as amostras, foi representada por um gráfico de ordenação multivariada de apenas uma dimensão (Eixo 1) (Figura 13). A distribuição das amostras da esquerda para a direita representa uma queda na qualidade do solo. A análise de ordenação separou claramente dois grupos: 1) Mata e 2) tratamentos representados pelas áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Dentro do grupo das áreas cultivadas ainda podemos observar que as amostras correspondentes das áreas cultivadas por período mais longo (30 anos) tiveram tendência de apresentar posições mais à direita.

Os valores para probabilidade (p) de existir diferença entre dois tratamentos, na profundidade de 0 a 20 cm, são apresentados na Tabela 23. Esses valores foram obtidos por meio da análise de “Multi-Response Permutation Procedures” - MRPP para comparação multivariada entre os tratamentos. Em uma análise prévia foi constatado que não houve diferença significativa, nem ao nível de 10% de probabilidade, entre os tratamentos de cultivo de inverno e verão para 14 e 30 anos de cultivo. Sendo assim, a análise de MRPP foi realizada considerando-se somente a comparação entre os

tempos de cultivo, sendo que, a Mata pode ser considerada como ponto de partida, ou seja, tempo zero. Confirmando a interpretação visual da Figura 13, observa-se que a mata apresentou diferença significativa, ao nível 1% de probabilidade, quando comparada com a área de 4 anos de cultivo e, ao nível de 0,1%, quando comparada com as áreas de 14 e 30 anos de cultivo (Tabela 23). A área cultivada por 4 anos não apresentou diferença significativa com as áreas cultivadas por 14 anos, no entanto, houveram diferenças significativas entre os tratamentos 4 anos e 30 anos e entre 14 anos e 30 anos, demonstrando uma tendência de gradiente decrescente da qualidade do horizonte Ap do Argissolo, com o tempo de cultivo.

Tabela 23. Valores de “p” da análise de “Multi-Response Permutation Procedures” (MRPP) para comparação multivariada entre os tempos de uso na profundidade de 0 a 20 cm.

Tratamentos	Mata	4 anos	14 anos
4 anos	0,0056 **		
14 anos	0,0004 ***	0,2065 ns	
30 anos	0,0003 ***	0,0264 *	0,0064**

*** Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 0,1% de probabilidade;

** Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 1% de probabilidade;

* Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 5% de probabilidade;

ns Diferença entre tratamentos não significativa.

Essa queda de qualidade no horizonte superficial do Argissolo estudado, devido ao cultivo com cana-de-açúcar, pode ser representada pela significância e sinal dos coeficientes de correlação de Pearson, entre as variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo, com os escores das amostras obtidos pela análise de MNS (Tabela 24).

Tabela 24. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo versus escores (eixo 1) das amostras, obtidos pela de ordenação multidimensional, para profundidade de 0 a 20 cm.

Variáveis	Coeficientes de Correlação
Grau de flocculação (GF)	-0,227 ns
Matéria orgânica total (MOT)	-0,919 **
Matéria orgânica particulada (MOP)	-0,963 **
Matéria orgânica complexada (MOC)	-0,864 **
% de matéria orgânica particulada (%MOP)	-0,834 **
% de matéria orgânica complexada (%MOC)	0,834 **
% de Agregação estável em água (%AGR)	-0,916 **
% de Agregados estáveis em água (%AEA)	-0,919 **
Diâmetro médio ponderado de agregado (DMP)	-0,930 **
Condutividade hidráulica saturada (Ko)	-0,113 ns
Densidade do solo (Ds)	0,978 **
Volume total de poros (VTP)	-0,964 **
Volume de microporos (VMicro)	-0,254 ns
Volume de macroporos (VMacro)	-0,812 **
Umidade crítica (UC)	0,276 ns
Densidade do solo máxima (DM)	0,885 **
Grau de compactação (GC)	0,723 **
Pressão pré-compactação média (σ_{pm})	0,859 **
Índice de recompressão (CRm)	-0,923 **
Índice de compressibilidade (ICm)	-0,921 **
Resistência à penetração em laboratório (RPLm)	0,787 **

** Coeficiente de correlação de Pearson significativo ao nível de 1 % de probabilidade;
ns Coeficiente de correlação de Pearson não significativo.

As variáveis que indicam compactação e degradação da matéria orgânica do solo (Ds, DM, GC, σ_{pm} , RPLm, e %MOC) apresentaram correlação significativa e positiva, indicando que as mesmas apresentam maiores valores no sentido da esquerda para a direita, no Eixo 1 do gráficos de ordenação (Figura 13). As variáveis indicadoras de qualidade do solo (%AGR, %AEA, DMP, VTP, VMacro, CRm, ICm, MOT, MOP e %MOP), que apresentam correlação significativa e sinal negativo, aumentaram no sentido da direita para

Tabela 28. Médias das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo, utilizadas na ordenação multidimensional, para profundidade de 0 a 20 cm.

Variáveis	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
GF (%)	77,47	63,48	74,38	87,71	63,10	69,52
MOT (g kg ⁻¹)	17,80	9,39	11,54	10,84	9,97	8,72
MOP (g kg ⁻¹)	3,97	1,42	1,81	1,80	1,52	0,98
MOC (g kg ⁻¹)	13,83	7,97	9,73	9,04	8,45	7,75
%MOP	22,44	15,28	15,71	16,65	15,31	11,27
%MOC	77,56	84,72	84,29	83,35	84,69	88,73
%AGR	84,10	34,67	35,11	31,69	22,36	31,26
%AEA	90,88	63,80	63,09	67,31	59,49	64,64
DMP (mm)	2,36	0,84	0,79	0,95	0,64	0,79
Ko (cm h ⁻¹)	22,83	23,94	28,31	24,08	20,93	23,51
Ds (Mg m ⁻³)	1,21	1,38	1,37	1,39	1,44	1,46
VTP (m ³ m ⁻³)	0,53	0,47	0,47	0,47	0,45	0,44
Vmicro (m ³ m ⁻³)	0,18	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16
Vmacro (m ³ m ⁻³)	0,35	0,32	0,31	0,31	0,29	0,28
UC (kg kg ⁻¹)	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13
DM (Mg m ⁻³)	1,69	1,89	1,85	1,85	1,86	1,89
GC (%)	71,44	72,60	74,07	75,12	77,09	77,15
σ _p m (kPa)	19	28	29	36	39	40
CRm	0,19	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10
lcm	0,24	0,18	0,18	0,17	0,15	0,14
RPLm (kPa)	186	356	310	414	477	699

A redução do teor de matéria orgânica no solo, devido ao cultivo intensivo com cana-de-açúcar em ambiente de tabuleiros costeiros, também foi observada por outros autores (Silva, 2003; Oliveira, 2008 e Vasconcelos, 2009). Silva et al. (2006) observaram correlação significativa e positiva entre o diâmetro médio ponderado (via úmida) com o teor de carbono orgânico total de um Argissolo, quando submetido a diferentes sistemas de cultivo com cana-de-açúcar. Os autores também verificaram que o cultivo com cana-de-açúcar reduziu a matéria orgânica total, a matéria orgânica particulada, a estabilidade de agregados em água e o diâmetro médio ponderado, quando comparado com o solo da mata nativa.

A compactação, que esta relacionada com a perda de qualidade do solo, sendo um sintoma do aumento da compressibilidade, que está relacionada com a resistência do solo à penetração das raízes, sendo que, valores elevados de pressão de pré-compactação apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes Römken & Miller (1971).

Na profundidade de 0 a 20 cm observou-se um grande aumento relativo na σ_{pm} e RPLm das áreas cultivadas em relação à Mata (Tabela 28), No entanto, os valores de RPLm podem ser considerados baixos. Segundo Lapeen et al., (2004), somente valores acima de 2000 kPa tem sido considerados limitantes ao crescimento de raízes, Portanto, a compactação do horizonte superficial do Argissolo estudado não deve ser o principal foco de preocupação, considerando sua textura leve e facilidade de preparo. Porém, sistemas de manejo que proporcionem o aumento da matéria orgânica devem ser priorizados. O conteúdo de matéria orgânica não é propriamente um indicador de qualidade relacionada à física do solo, mas influencia direta e indiretamente várias propriedades físicas que estão correlacionadas com a condição estrutural do solo, que por sua vez estabelece relações fundamentais com o seu comportamento hidrológico, principalmente, no sentido de garantir quantidade de água disponível para as plantas em períodos de baixa precipitação.

4.2 Horizonte AB (20 a 40 cm)

A Figura 15 representa a variabilidade da qualidade do solo obtida por meio da análise ordenação multivariada (NMS), das amostras no espaço das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica na profundidade de 20 a 40 cm do Argissolo estudado.

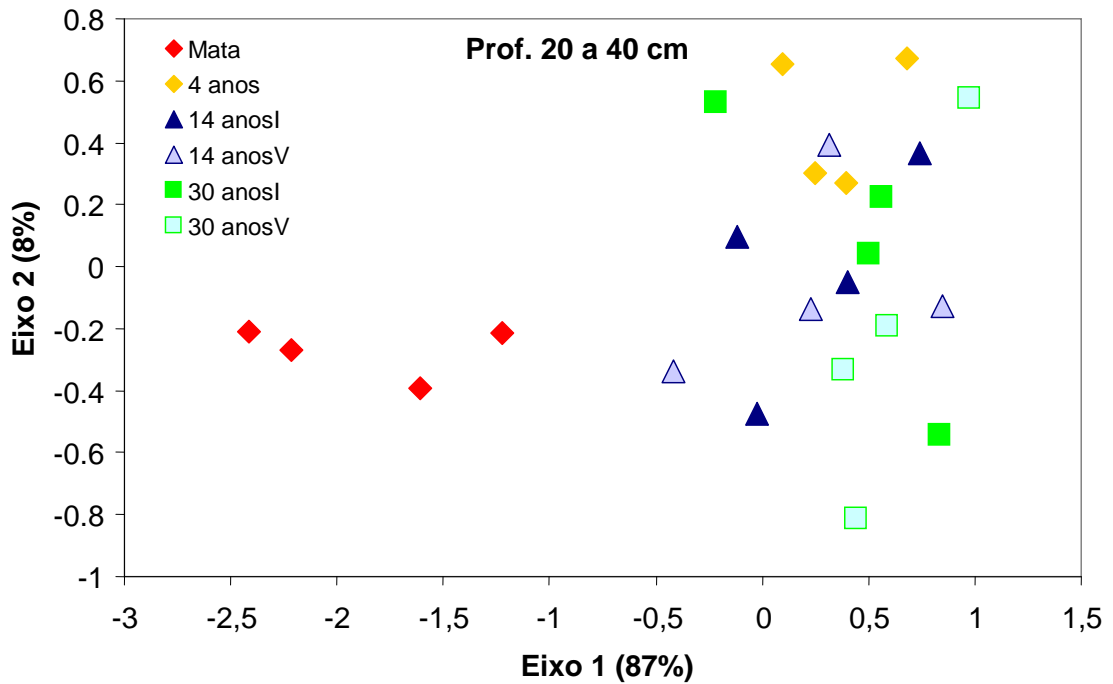


Figura 15. Gráfico de ordenação multidimensional das amostras no espaço das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo, para profundidade de 20 a 40 cm.

A análise NMS, para o horizonte AB, apresentou comportamento semelhante ao do horizonte superficial, porém, 95 % da variabilidade da qualidade das amostras do solo foi representada por um gráfico em duas dimensões. Os Eixo 1 e 2 contribuíram com 87 e 8% da variabilidade da qualidade do solo, respectivamente (Figura 15). Portanto, para o horizonte AB, pode-se considerar o Eixo 1 como o mais importante na explicação da variabilidade da qualidade das amostras.

Foi verificado que não houve diferença significativa, mesmo ao nível de 10% de probabilidade, entre os tratamentos de cultivo de inverno e verão para 14 e 30 anos de cultivo. Sendo assim, a análise de MRPP foi realizada considerando-se somente a comparação entre os tempos de cultivo. A Mata apresentou diferença significativa, ao nível de 1% de probabilidade, quando comparada com a área de 4 anos de cultivo e, ao nível de 0,1% de probabilidade, quando comparada com as áreas de 14 e 30 anos de cultivo (Tabela 29). Houve uma diferença significativa, entre as áreas cultivadas por 4, 14 e 30 anos, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 29. Valores de “p” da análise de “Multi-Response Permutation Procedures” (MRPP) para comparação multivariada entre os tempos de uso na profundidade de 20 a 40 cm.

Tratamentos	Mata	4 anos	14 anos
4 anos	0,0059 **		
14 anos	0,0004 ***	0,0152 *	
30 anos	0,0003 ***	0,0233 *	0,0140 *

*** Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 0,1% de probabilidade;

** Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 1% de probabilidade;

* Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 5% de probabilidade;

ns Diferença entre tratamentos não significativa.

Na Figura 15, quando rebatemos os pontos referentes aos escores da amostra no Eixo 1, observa-se a similaridade com os resultados obtidos para a profundidade de 0 a 20 cm, podendo-se separar a amostra em dois grupos: 1) Mata e 2) áreas cultivadas. No entanto, considerando o rebatimento no Eixo 1, não fica clara uma tendência ou separação dentro do grupo das áreas cultivadas.

Nessa profundidade, as variáveis D_s , $VMicro$, DM , GC , σ_{pm} , RPL e $\%MOC$ apresentaram no Eixo 1 correlação com sinal positivo e significativa, ao nível de 1% de probabilidade, com os escores das amostras (Tabela 30). Esses resultados indicam que as amostras das áreas cultivadas, que estão localizadas mais à direita no gráfico de NMS (Figura 15), apresentam maior compactação e maior associação da matéria orgânica com as partículas minerais do solo (matéria orgânica complexada). As variáveis $\%AGR$, $\%AEA$, DMP , K_o , VTP , $VMacro$, CRm , ICm , MOT , MOP e $\%MOP$ apresentaram correlação negativa e significativa com os escores das amostras no Eixo 1, indicando que as amostras da mata apresentaram maior estabilidade de agregados, maior macroporosidade, maior permeabilidade, maior compressibilidade e menor grau de decomposição da matéria orgânica, respectivamente.

As pressões aplicadas nessa camada resultaram em sua compactação, causando principalmente a diminuição da estabilidade de agregados e diminuição do volume e porcentagem de macroporos, com conseqüente diminuição na capacidade de infiltração de água e aumento da resistência do solo à penetração de raízes (Tabela 31).

Tabela 30. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo versus escores (Eixo 1 e Eixo 2) das amostras, obtidos pela de ordenação multidimensional, para a profundidade de 20 a 40 cm.

Variáveis	Coeficientes de Correlação	
	Eixo 1	Eixo 2
Grau de flocculação (GF)	-0,227 ns	0,475 **
Matéria orgânica total (MOT)	-0,423 *	0,450 *
Matéria orgânica particulada (MOP)	-0,769 **	0,383 *
Matéria orgânica complexada (MOC)	-0,301 ns	0,414 *
% de matéria orgânica particulada (%MOP)	-0,707 **	0,312 ns
% de matéria orgânica complexada (%MOC)	0,707 **	-0,312 ns
% de Agregação estável em água (%AGR)	-0,831 **	0,201 ns
% de Agregados estáveis em água (%AEA)	-0,852 **	0,134 ns
Diâmetro médio ponderado de agregado (DMP)	-0,941 **	-0,060 ns
Condutividade hidráulica saturada (Ko)	-0,745 **	-0,483 **
Densidade do solo (Ds)	0,855 **	0,213 ns
Volume total de poros (VTP)	-0,859 **	-0,167 ns
Volume de microporos (VMicro)	0,499 **	0,594 **
Volume de macroporos (VMacro)	-0,814 **	-0,501 **
Umidade crítica (UC)	0,281 ns	0,416 *
Densidade do solo máxima (DM)	0,480 **	-0,244 ns
Grau de compactação (GC)	0,695 **	0,328 ns
Pressão pré-compactação média (σ_p)	0,799 **	0,464 **
Índice de recompressão (CRm)	-0,934 **	-0,220 ns
Índice de compressibilidade (ICm)	-0,690 **	-0,069 ns
Resistência à penetração em laboratório (RPLm)	0,871 **	0,214ns

** Coeficiente de correlação de Pearson significativo ao nível de 1 % de probabilidade;

* Coeficiente de correlação de Pearson significativo ao nível de 5 % de probabilidade;

ns Coeficiente de correlação de Pearson não significativo.

A Figura 16 representa o resultado da análise de NMS das variáveis dentro do espaço das amostras do horizonte AB. Nesta figura fica clara a importância da maior quantidade de matéria orgânica particulada, maior diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água e maior permeabilidade do horizonte AB das amostras retiradas na Mata, em relação às

amostras das áreas cultivadas, que apresentaram maior resistência à penetração na profundidade de 20 a 40 cm (Tabela 31).

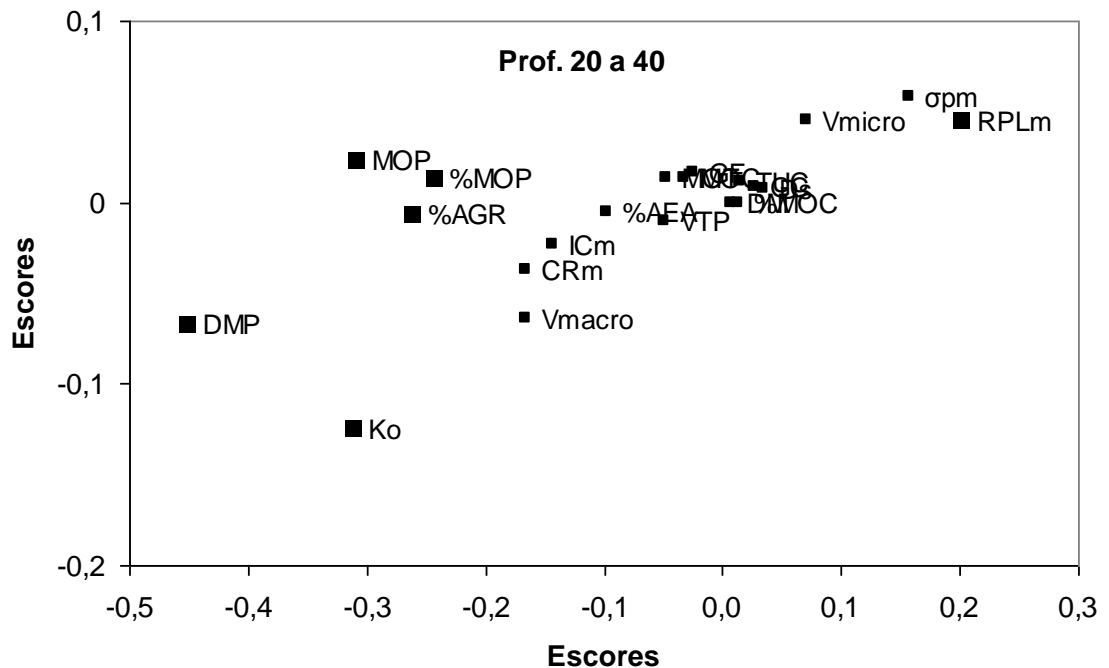


Figura 16. Gráfico de ordenação multidimensional das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo no espaço das amostras, para profundidade de 20 a 40 cm.

Em um grau de importância menor estão as variáveis VMacro, IC, CR e σ_{pm} (Figura 16). No entanto, essas variáveis confirmam a compactação subsuperficial do Argissolo que teve a macroporosidade do horizonte AB diminuída, com conseqüente diminuição da condutividade hidráulica saturada (K_o) (Tabela 31). O cultivo da cana-de-açúcar também diminuiu a compressibilidade no horizonte AB, fato confirmado pela maior σ_{pm} , menor ICm e menor CRm, das áreas cultivadas em relação à Mata (Tabela 31), indicando que o horizonte AB das áreas cultivadas tem menos elasticidade tanto na reta virgem como na reta secundária da curva de compressão.

Para essa profundidade, as áreas cultivadas apresentaram RPLm duas vezes maior do que o solo sob mata nativa (Tabela 31). Os valores médios dessa variável superaram 2000 kPa, que é o limite de resistência à penetração que passa a ser restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular da maioria das plantas (Lapen et al., 2004). Essa pode ser uma explicação para a

observação visual do menor volume de raízes de cana-de-açúcar a partir dos 20 cm de profundidade.

Tabela 31. Médias das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo, utilizadas na ordenação multidimensional, para profundidade de 20 a 40 cm.

Variáveis	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
GF (%)	52,95	54,36	45,11	45,60	54,18	49,06
MOT (g kg ⁻¹)	8,74	8,33	8,28	7,73	7,46	7,45
MOP (g kg ⁻¹)	0,67	0,42	0,46	0,44	0,34	0,27
MOC (g kg ⁻¹)	8,07	7,90	7,81	7,29	7,11	7,19
%MOP	7,51	5,03	5,79	5,71	4,42	3,66
%MOC	92,49	94,97	94,21	94,29	95,58	96,34
%AGR	66,41	43,90	34,23	32,05	36,98	29,90
%AEA	85,20	70,84	65,38	69,76	68,23	60,01
DMP (mm)	1,73	0,67	0,59	0,78	0,68	0,53
Ko (cm h ⁻¹)	5,33	2,06	3,35	2,84	2,32	2,98
Ds (Mg m ⁻³)	1,41	1,58	1,58	1,58	1,55	1,53
VTP (m ³ m ⁻³)	0,45	0,39	0,39	0,39	0,40	0,41
Vmicro (m ³ m ⁻³)	0,17	0,25	0,21	0,20	0,22	0,22
Vmacro (m ³ m ⁻³)	0,28	0,14	0,18	0,19	0,19	0,19
UC (kg kg ⁻¹)	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,12
DM (Mg m ⁻³)	1,93	1,95	1,99	1,95	1,98	2,00
GC (%)	73,49	81,17	79,49	81,35	78,21	78,32
σ _p m (kPa)	50	99	82	77	88	88
CRm	0,10	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
lcm	0,20	0,14	0,13	0,12	0,15	0,17
RPLm (kPa)	1114	2289	2412	2178	2215	2423

4.3 Horizonte Bt (40 a 60 cm)

Os resultados da análise de NMS das amostras no espaço das variáveis de física do solo e matéria, para a profundidade de 40 a 60 cm (horizonte Bt), são apresentados na Figura 17.

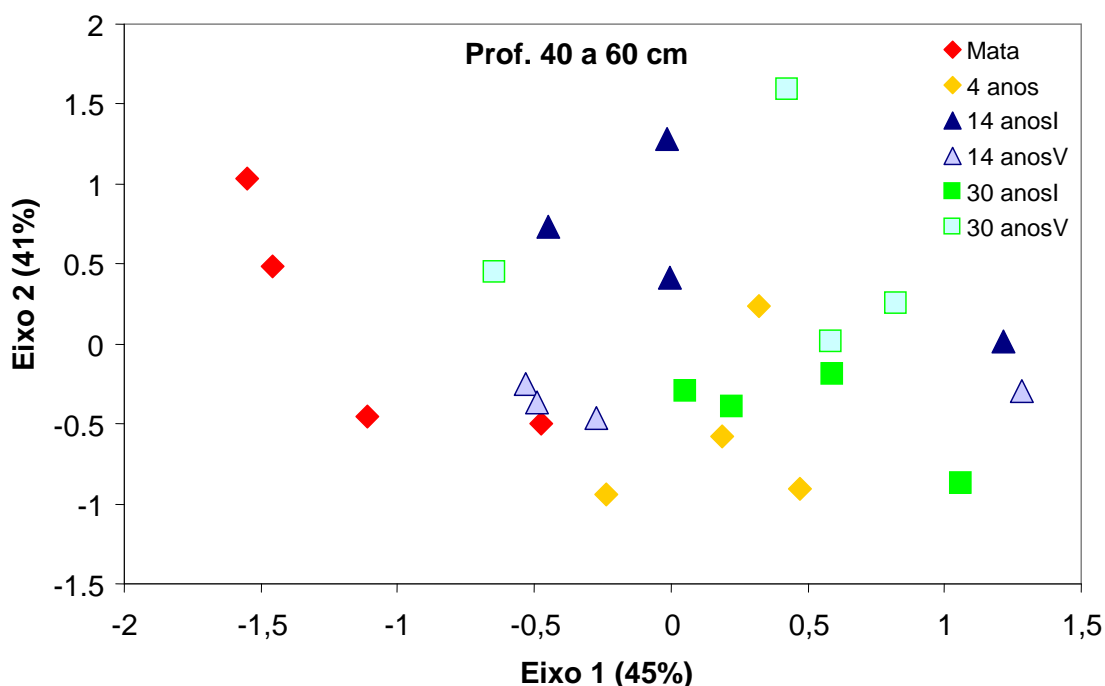


Figura 17. Gráfico de ordenação multidimensional das amostras no espaço das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo, para profundidade de 40 a 60 cm.

Para esse horizonte 86% da variabilidade da qualidade das amostras do solo foi representada por um gráfico em duas dimensões. Os Eixo 1 e 2 contribuíram com 45 e 41% da variabilidade da qualidade do solo, respectivamente (Figura 17).

Nessa profundidade as diferenças entre os tratamentos são menos claras do que nos horizontes superficiais, ficando os pontos representantes das amostras das áreas cultivadas dispersos em uma região mais a direita do gráfico. Entretanto, três pontos referentes às amostras da Mata ficaram isolados mais à esquerda do gráfico (Figura 17), indicando um comportamento diferenciado do horizonte Bt da testemunha padrão, em relação às áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Essa tendência pode ser confirmada pelos resultados da análise de MRPP (Tabela 32). A Mata apresentou qualidade do solo para o horizonte Bt significativamente diferente das áreas cultivadas, porém, quando comparadas entre si, observou-se diferença significativa somente entre a área de 4 anos e de 30 anos de cultivo.

Tabela 32. Valores de “p” da análise de “Multi-Response Permutation Procedures” (MRPP) para comparação multivariada entre os tempos de uso na profundidade de 40 a 60 cm.

Tratamentos	Mata	4 anos	14 anos
4 anos	0,0134 *		
14 anos	0,0104 *	0,0688 ns	
30 anos	0,0030 **	0,0213 *	0,2824 ns

** Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 1% de probabilidade;

* Diferença entre tratamentos significativa ao nível de 5% de probabilidade;

ns Diferença entre tratamentos não significativa,

Na Figura 17, quando rebatemos os pontos no Eixo 2 podemos observar que existe uma grande dispersão das amostras, porém não há uma lógica de agrupamento entre amostras de um mesmo tratamento. Sendo assim, consideramos maior importância do Eixo 1 na explicação da qualidade do horizonte Bt do Argissolo estudado, devido a melhor separação das amostras da Mata em relação aos demais tratamentos.

Com objetivo de verificar a importância das variáveis de física do solo e matéria orgânica na separação dos tratamentos, foi realizada análise de NMS das variáveis dentro do espaço das amostras do horizonte Bt (Figura 18). Os resultados obtidos são similares ao encontrados para o horizonte AB, onde fica destacada a importância da maior quantidade de matéria orgânica particulada, maior diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água e maior permeabilidade do horizonte Bt, das amostras retiradas na Mata em relação às amostras das áreas cultivadas, que apresentaram maior resistência à penetração na profundidade de 40 a 60 cm (Tabela 34).

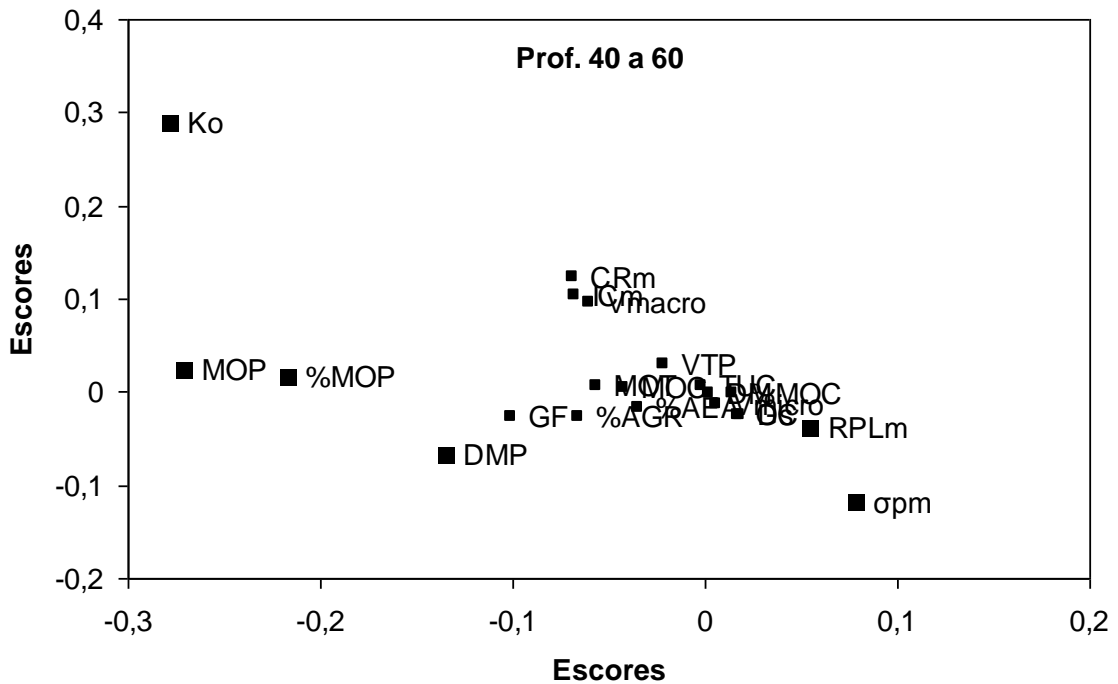


Figura 18. Gráfico de ordenação multidimensional das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do Argissolo no espaço das amostras, para profundidade de 40 a 60 cm.

As variáveis Ko, MOP, %MOP e DMP apresentaram correlação negativa e significativa, ao nível de 1% de probabilidade, com os escores das amostras no espaço das variáveis, para a profundidade de 40 a 60 cm (Tabela 33). As variáveis σ_{pm} e RPLm apresentaram correlação positiva e significativa, ao nível de 1 e 5%, respectivamente, com os escores das amostras.

Esses resultados demonstram que mesmo em maiores profundidades do perfil do Argissolo, o cultivo com cana-de-açúcar afetou a estrutura do solo, diminuindo a estabilidade de agregados e a capacidade de infiltração de água, bem como, aumentou a σ_{pm} e a RPLm (Tabela 34).

Considerando que todas as áreas cultivadas foram subsoladas na ocasião da implantação dos canaviais, esperava-se uma menor pressão de pré-compactação e resistência a penetração do horizonte Bt do solo dessas áreas, quando comparado com o solo sob mata nativa. O resultado contrário indica que o efeito da operação de subsolagem foi sendo eliminado ao longo dos quatro anos de cultivo, ressaltando que as lavouras encontravam-se no quarto corte. Portanto, mesmo sendo atenuada ao longo do perfil do solo, as pressões impostas na superfície durante as operações de colheita e tratos

culturais, parecem estar sendo aplicadas a níveis e em condição de umidade do solo, suficientes para superar a capacidade de suporte de carga das camadas mais profundas, causando a compactação subsuperficial, com conseqüente aumento da resistência do solo à penetração.

Tabela 33. Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo versus escores (eixo 1) das amostras, obtidos pela de ordenação multidimensional, para profundidade de 40 a 60 cm.

Variáveis	Coeficientes de Correlação	
	Eixo 1	Eixo 2
Grau de floculação (GF)	-0,477 **	-0,138 ns
Matéria orgânica total (MOT)	-0,614 **	0,067 ns
Matéria orgânica particulada (MOP)	-0,840 **	0,081 ns
Matéria orgânica complexada (MOC)	-0,483 **	0,055 ns
% de matéria orgânica particulada (%MOP)	-0,758 **	0,063 ns
% de matéria orgânica complexada (%MOC)	0,755 **	-0,064 ns
% de Agregação estável em água (AGR)	-0,552 **	-0,261 ns
% de Agregados estáveis em água (AEA)	-0,403 *	-0,218 ns
Diâmetro médio ponderado de agregado (DMP)	-0,593 **	-0,336 ns
Condutividade hidráulica saturada (Ko)	-0,536 **	0,628 **
Densidade do solo (Ds)	0,467 **	-0,729 **
Volume total de poros (VTP)	-0,458 **	0,733 **
Volume de microporos (Vmicro)	0,105 ns	-0,277 ns
Volume de macroporos (Vmacro)	-0,442 *	0,787 **
Umidade crítica (UC)	-0,057 ns	0,176 ns
Densidade do solo máxima (DM)	0,119 ns	-0,080 ns
Grau de compactação (GC)	0,460 *	-0,758 **
Pressão pré-compactação média (σ_{pm})	0,470 **	-0,808 **
Índice de recompressão (CRm)	-0,417 *	0,842 **
Índice de compressibilidade (ICm)	-0,462 *	0,800 **
Resistência à penetração em laboratório (RPLm)	0,458 *	-0,368 *

** Coeficiente de correlação de Pearson significativo ao nível de 1 % de probabilidade;

* Coeficiente de correlação de Pearson significativo ao nível de 5 % de probabilidade;

ns Coeficiente de correlação de Pearson não significativo.

Tabela 34. Médias das variáveis de atributos físicos e matéria orgânica do solo, utilizadas na ordenação multidimensional, para profundidade de 40 a 60 cm.

Variáveis	TRATAMENTOS					
	Mata	4 anos I	14 anos I	14 anos V	30 anos I	30 anos V
GF (%)	46,29	51,19	39,62	39,89	24,45	27,86
MOT (g kg ⁻¹)	8,12	7,62	6,49	7,84	7,06	7,21
MOP (g kg ⁻¹)	0,70	0,41	0,37	0,51	0,40	0,43
MOC (g kg ⁻¹)	7,42	7,21	6,12	7,34	6,67	6,79
%MOP	8,54	5,37	5,60	6,26	5,72	5,99
%MOC	91,46	94,63	94,40	93,74	94,28	94,01
%AGR	68,33	62,75	54,79	65,03	59,96	59,12
%AEA	84,70	74,08	74,38	84,72	79,80	78,12
DMP (mm)	1,41	1,21	0,77	1,25	1,01	0,89
Ko (cm h ⁻¹)	5,30	1,74	4,05	2,00	2,07	3,22
Ds (Mg m ⁻³)	1,40	1,46	1,39	1,46	1,48	1,41
VTP (m ³ m ⁻³)	0,46	0,43	0,46	0,43	0,43	0,45
Vmicro (m ³ m ⁻³)	0,25	0,28	0,26	0,26	0,28	0,26
Vmacro (m ³ m ⁻³)	0,22	0,16	0,21	0,18	0,16	0,20
UC (kg kg ⁻¹)	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
DM (Mg m ⁻³)	1,92	1,88	1,90	1,87	1,89	1,87
GC (%)	72,98	77,78	73,19	78,10	77,95	75,03
σ _p m (kPa)	86	131	85	113	131	103
CRm	0,10	0,07	0,10	0,08	0,07	0,09
lcm	0,26	0,20	0,26	0,22	0,21	0,26
RPLm (kPa)	1991	2598	2509	2243	2249	2261

CONCLUSÕES

A pressão de pré-compactação e a resistência do Argissolo à penetração variam exponencialmente em função da umidade nas três profundidades estudadas, independente do tipo e tempo de uso.

Os três horizontes do Argissolo da mata nativa apresentam menor pressão de pré-compactação e resistência à penetração em laboratório, em relação às áreas cultivadas, principalmente nas umidades mais baixas.

O horizonte Ap do Argissolo estudado apresenta maior compactação nas áreas com maior tempo de cultivo com cana-de-açúcar.

Por apresentar resistência mecânica à penetração abaixo da considerada como crítica (2000 kPa) para o desenvolvimento de raízes, mesmo para umidades referentes ao ponto de murcha permanente, a compactação do horizonte Ap não deve ser considerada fator limitante.

O cultivo com cana-de-açúcar diminui a porosidade e aumenta a densidade do Argissolo estudado na profundidade de 0 a 20 cm, resultando em aumento do intervalo hídrico ótimo (IHO).

O cultivo com cana-de-açúcar provoca a compactação dos horizontes subsuperficiais, havendo a redução da compressibilidade, bem como, a elevação da resistência à penetração a níveis críticos ao desenvolvimento de raízes, mesmo em umidades próximas a da capacidade de campo, o que resulta em redução do IHO dos horizontes AB e Bt das áreas cultivadas.

Os modelos de pressão de pré-compactação em função da umidade do solo devem ser utilizados na determinação da capacidade de suporte de carga do Argissolo, principalmente para o horizonte AB, com o objetivo de evitar compactações adicionais e aumento na resistência mecânica à penetração nesta profundidade, preconizando maior aprofundamento do sistema radicular das lavouras de cana-de-açúcar.

Nas três profundidades estudadas, o grau de compactação e a densidade do solo são os atributos que apresentam maior relação causa e

efeito com a pressão de pré-compactação e resistência à penetração do Argissolo estudado.

Nos horizontes A ou Ap, a matéria orgânica e a estabilidade de agregados em água apresentam efeito direto sobre as variações da pressão de pré-compactação e resistência à penetração, sendo que, a mata apresenta maior teor de matéria orgânica, maior porcentagem de agregados estáveis e maior compressibilidade, em relação às áreas cultivadas.

A análise de MNS aponta uma queda na qualidade do Argissolo estudado, mesmo com poucos anos de cultivo com cana-de-açúcar, principalmente, para os horizontes Ap e AB.

A principal perda na qualidade do horizonte Ap pode ser atribuída à diminuição no teor de matéria orgânica e na estabilidade de agregados em água, principalmente, devido à diminuição na porcentagem de matéria orgânica particuladas das áreas cultivadas em relação ao Argissolo sob mata nativa.

No horizonte AB das áreas cultivadas, a perda na qualidade do solo pode ser atribuída a sua compactação, que provoca a diminuição da macroporosidade e condutividade hidráulica saturada, bem como, o aumento na pressão de pré-compactação e resistência mecânica a penetração de raízes.

BIBLIOGRAFIA

ABNT, **Solo: Ensaio de Compactação** – NBR 7182, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnica, 1986, 10p.

ABNT, **Solo: Ensaio de adensamento unidimensional** – MB 3336, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnica, 1990, 13p.

ANDREWS, S.S., KARLEN, D.L.; MITCHELL, J.P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.90, p.25-45., 2002.

ARAÚJO FILHO, J.C. de; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. e. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos de tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil, In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju, **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC, 2001, p.19-46.

ARAÚJO FILHO, J.C. de; SILVA, F.B.R e; SILVA, S.S.L. da. Solos dos tabuleiros costeiros: horizontes coesos e cimentados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília, **Anais...** Brasília: SBCS, 1999, 1 CD.

ARVIDSSON, J.; KELLER, T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure, **Soil & Tillage Research**, v.96, p.284-291, 2007.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4,ed, New York, John Wiley & Sons, 1972, 529p.

BENNIE, A.T.P.; KRYNAUW. G.N. Causes, adverse effects of soil compaction, **South African Journal Plant Soil**, v.2, p.109–114, 1985.

BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop response to wheel traffic soil compaction. **Transactions of the ASAE**, v.34, p.909-913, 1991.

BIGNER, R.L.; WELLS, L.G. Compact—a reclamation soil compaction model. Part I, Model development, **Transactions of the ASAE**, v.53, p.405–413, 1992.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R.M.L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.

BRADFORD, J.M.; GUPTA, S.C. Compressibility. In: **Methods of soil analysis**. Part I. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, WL, USA, p.476–479, 1986.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedade dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Barros, 898 p. 1989.

BRAIDA, J.A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**, UFSM, Santa Maria, 2004, 107p. (Tese de Doutorado)

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

CALEGARI, A.; MEDEIROS, G.B. de. Utilização de práticas biológicas na recuperação de camadas superficiais adensadas/compensadas. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. 2001, Aracaju, **Anais...** Aracaju: EMBRAPA- CPATC, 2001, p, 243-259.

CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E. A; WILDNER, L. do P.; COSTA, M.B. da. ALCÂNTARA, P.B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T. J. C. **Adubação verde no Sul do Brasil**. 2. ed, Rio de Janeiro: AS-PTA, 1993, 346p.

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas, Fundação Cargill, 44 p. 1983.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777-783, 1992.

CANARACHE, A.; HORN. R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**, v.56, p.185-196, 2000.

CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A.; AMARAL, N.M.B. Reações da matéria orgânica, In: Santos, G.A.; Camargo, F.A.O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, Porto Alegre: Gênese, 1999, 508p.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. v.1, 4 ed., Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1980, 219p.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C. da. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.137-147, 2006.

CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.997-1003, 1999.

CHAUDHURY, M.; MANDAL, U.; MANDAL, B. Assessing soil quality under long-term rice-based cropping system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.1141-1161, 2005.

CINTRA, F.L.D. ; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. da. Tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil: uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camadas coesas dos solos. **Boletim Informativo da SBCS**, Campinas, n.18, p.81-95, 1997.

CINTRA, F.L.D.; MELLO IVO, W.M.P. de; SILVA, L.V. da; LEAL, M. de, L. da. S. **Distribuição das raízes de cana-de-açúcar em sistemas e cultivo com adubação orgânica e *Crotalaria spectabilis***, Aracaju, 20 p. 2006. (Embrapa - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 12)

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3 ed., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 480p. 2004.

CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. **Soil Science Society American Journal**, v.51, p.562-567, 1987.

D'AGOSTINI, L.R. **Variações temporais da coesividade entre agregados de solo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992, 82p. (Tese de Doutorado)

DEMATTE, J.L.I. **Apontamentos do curso de manejo de solos tropicais**. Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001, 442p.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 114p. 1994, (Tese de Doutorado)

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v.I, p.56-94, 2000.

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N. do; ANDRADE, S. C. da; AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de argissolos em sistemas agroflorestais. **CERNE**, v.8, n.1, p.103-114, 2002.

DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182, 1996.

DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S.; LEITE, F.R. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.805-810, 2004.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA Special publication, 35).

DURUOHA, C.; BENEZ, S.H.; CRUSCIOL, C.A.C. Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em função da compactação, do tipo de solo e do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.16, p.35-46, 2001.

EMBRAPA, Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária, **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, 1999, 370p.

EMBRAPA, Embrapa Solos, **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª edição, Rio de Janeiro, 2006, 300p.

ETANA, A.; COMIA, R.A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.13–21, 1997.

FERREIRA, P.H. de M. **Princípios de manejo e conservação do solo**. São Paulo: Nobel, 135 p. 1992,

GALVÃO, A.S. **Rendimento de cana-de-açúcar e alguns atributos físicos de um argissolo afetado pelo sistema de preparo do solo**. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2002, 75p. (Dissertação de Mestrado)

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A. R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v.113, p.95-108, 2003.

GOMES, T.C. de A. **Análise de trilha no estudo de fatores físicos e químicos relacionados ao adensamento e, ou, à compactação em dois solos do norte de Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996, 105p. (Dissertação de Mestrado)

GUPTA, S.C; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility soil to excessive compaction, **Advanced Soil Science**, v.6, p.65-100, 1987.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Advanced Agronomy**, v.41, p.331–338, 1989.

HILL, R.L.; HORTON, R.; CRUSE, M.R. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols, **Soil Science Society American Journal**, v.49, p.1264-1270, 1985.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980, 413p.

HORN, R.; DOMZAL, H.; OUWERKERK, C. Van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soil and the environment. **Soil & Tillage Research**, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT. M, Soil compactability and compressibility, In: Soane, B.D.; Ouwerkerk, C. van. **Soil compaction in crop production**, Amsterdam, Elsevier, 1994, 662p.

HORN, R.; TAUBNER, H.; WUTTKE, M.; BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. **Soil & Tillage Research**, v.30, p.187-216,1993.

IBGE. Banco de Dados Agregado – Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA, Disponível: <http://www.ibge.gov.br> - consultado no mês de agosto de 2009.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.11-18. 2001.

JACOMINE, P.K.T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. 2001, Aracaju, **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC, 2001, p.19-46.

JACOMINI, P.K.T; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P.; SILVEIRA, C.O. **Levantamento exploratório. Reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. Recife: Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975, 531p. (Boletim Técnico, 35)

KARLEN, D.; STOTT, D. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.53-72 (SSSA, Special Publication 35).

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Eds.), **Methods of soil analysis** : physical and mineralogical properties. including statistics of measurement and sampling. Madison, American Society of Agronomy, 1965, Part 1, p.499-510.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.), **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1986, Part 1, p.425-442 (Agronomy, 9).

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**: relação solo-planta. São Paulo, Ceres, 1979, 262p.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 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**, v.23, p.497-506, 1999b.

KRUSKAL, J.B. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. **Psychometrika**, v.29, p.1-27, 1964.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production. **Soil & Tillage Research**, v.78, p.151-170, 2004.

LARSON, W.E.; EYNARD, A.; HADAS, A.; LIPEC, J. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**, p.597-625, 1994.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Science Society American Journal**, v.44, n.3, p.450-457, 1980.

LEBERT, M.; HORN, R. A. Method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v.19, p.275-286, 1991.

LIMA, C.L.R. de; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.409-414, 2004.

LIMA, C.L.R. de; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LIMA, H.V.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

MACHADO, J.L.; TORMENA, A.C.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter-relações entre propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.495-502, 2008.

MAIA, J.L.T.; RIBEIRO, M.R. Propriedades de um argissolo amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.1, p.79-87, 2004.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. **Soil & Tillage Research**, v.49, p.185-199, 1998.

McCUNE, B.; J.B. GRACE. **Analysis of ecological communities**. Glenden Beach, OR: MjM Software Design. 2002. 300p.

MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 3ª Edição, Porto Alegre, 2006, 285p.

NACIF, P.G.S. **Efeitos da subsolagem em propriedades físico-hídricas de um latossolo amarelo álico coeso representativo do recôncavo baiano**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 75p, 1994. (Dissertação de Mestrado)

NASCIMENTO, G.B. do. **Caracterização dos solos e avaliação de propriedades edáficas em ambiente de tabuleiros costeiros da região Norte Fluminense (RJ)**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 162p, 2001. (Dissertação de Mestrado).

NHANTUMBO, A.B.J.C.; CAMBULE, A.H. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil & Tillage Research**, v.87, p.231–239, 2006.

OLIVEIRA, V.S. de. **Compactação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 81p, 2008. (Tese de Doutorado).

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, C.B.M.; SILVEIRA, K.R.P.; TREVISAN, A.A. ; MURATA, I.M. Escarificação de um latossolo vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.911-917, 2004.

REAVES, C.A.; COOPER, A.W. Stress distribution in soil under tractor roads. **Journal of Agricultural Engineering Society**, Bunkyo,v. 41, p.20-31, 1960.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 29, Ribeirão Preto, 2003, **Anais ... Ribeirão Preto**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, CD.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. de; CORRÊA, G.F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 4 ed. Viçosa, NEPUT, 338p, 2002.

REZENDE, J. de O. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros**: limitações agrícolas e manejo. Salvador: SEAGRI-SPA, 2000, 117 p. (SEAGRI/SPA, Série Estudos Agrícolas, 1)

REZENDE, J.de O.; MAGALHÃES, A.F.de.J.; SHIBATA, R.T. **Citricultura nos solos coesos dos tabuleiros costeiros**: análises e sugestões, Salvador: SEAGRI/SPA, 2002a, 96p. (SEAGRI/SPA, Série Estudos Agrícolas, 3)

ROCHA, W.W.; DIAS JUNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V; SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.2, p.298-303, 2002.

RÖMKENS, M.J.M.; MILLER, R.D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data – A mathematical model. **Plant Soil**, v.35, p.237-248, 1971.

SANTANA, M.B. **Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores da coesão em dois solos dos Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003, 76p. (Dissertação de Mestrado)

SANTOS, D.M.B. **Efeitos da subsolagem mecânica sobre a estrutura de um solo de “tabuleiro”(latossolo amarelo álico coeso) no município de cruz das Almas-Bahia.(Caso 2)**. UFBA – Instituto de Geociência, Salvador, 1992, 87p. (Dissertação de Mestrado)

SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. Soil resilienc: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, p. 224-234, 1999.

SHEPARD, R.N. The analysis of proximities: multidimensional scaling with an unknown distance function. I. **Psychometrika**, v.27, p. 125-139, 1962.

SILVA, A.J.N. **Caracterização de latossolos amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas**. UFRPE, Recife, 1996, 133p. (Dissertação de Mestrado)

SILVA, A.J.N. **Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. UFRGS, Porto Alegre, 2003, 120p. (Tese de Doutorado)

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, S.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.579-585, 2006.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.677-684, 1997.

SILVA, A.R.; LIMA, J.M.; DIAS JUNIOR, M.S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.219-226, 1999.

SILVA, M. S. L da.; RIBEIRO, M. R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar nas propriedades químicas de solos argilosos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.3, p.389-394, 1995.

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**, 26:9-15, 2002.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.179-201, 1990.

SOUZA, L.S. Uso e manejo dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS - pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros, 1996, Cruz das Almas, **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC/EMBRAPA-CPNMF/EAUFBA/IGUFBA, 1996, p.36.75.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; VILLAR, O.M. Compactação do solo. In: **Ensaio de laboratório em mecânica do solo**. São Paulo, USP. p.81-93. 1981.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: Embrapa-CNPSO, 71p, 1993. (EMBRAPA-CNPSO. Circular Técnica, 12)

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ V.,V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. **Tópicos em ciência do solo**.Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.195-276.

VASCONCELOS, R.F.B. de. **Comportamento mecânico de um Latossolo Amarelo não saturado sob diferentes sistemas de manejos culturais de cana-de-açúcar**. UFRPE, Recife, 132 p. 2009. (Tese de Doutorado)

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society American Journal**, v.48, p.1220-1225, 1984.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, v.114, p.401-414, 2003.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil & Tillage Research**, v.60, n.1-2, p.11-19, 2001.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society American Journal**, v.61, p.239-245, 1997.