

UILKA ELISA TAVARES

**RESISTÊNCIA MECÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO
SUBMETIDO A DIFERENTES PREPAROS DO SOLO**

Recife – PE

2016

UILKA ELISA TAVARES

**RESISTÊNCIA MECÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO
SUBMETIDO A DIFERENTES PREPAROS DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia agrícola

Orientador:

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

Recife – PE

2016

Ficha catalográfica

T231r	Tavares, Uilka Elisa Resistência mecânica e atributos físicos de um argissolo submetido a diferentes preparos do solo / Uilka Elisa
Tavares. –	Recife, 2016. 90 f. : il.
Universidade	Orientador: Mário Monteiro Rolim. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2016. Inclui referências.
Cisalhamento do Rolim,	1. <i>Saccharum spp.</i> 2. Atributos físicos 3. solo 4. Tensão de pre-consolidação 5. Compactação I. Mário Monteiro, orientador II. Título
	CDD 631

UILKA ELISA TAVARES

**RESISTÊNCIA MECÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO
SUBMETIDO A DIFERENTES PREPAROS DO SOLO**

Tese defendida em 25 de fevereiro de 2016 pela Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim
DEAGRI-UFRPE

Examinadores:

Profa. Dra. Elvira Maria Regis Pedrosa
DEAGRI-UFRPE

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes
CTG - UFPE

Prof. Dr. Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos
DEAGRI-UFRPE

Prof. Dr. Djalma Eusébio Simões Neto
EECAC - UFRPE

Dedico

A minha mãe, Inácia e ao meu pai, Ernesto.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de compartilhar minha alegria agradecendo todos aqueles que contribuíram para a conclusão deste trabalho:

A Deus, pela vida, família e amigos.

A minha família que sempre me apoia nesta e em todas as jornadas.

A UFRPE e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de cursar o doutorado.

Ao orientador Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim, pela amizade, orientação e apoio durante o curso e ao Prof. Dr. Veronildo Souza de Oliveira pela orientação e ajuda na condução do experimento no campo.

Aos professores Elvira Maria Regis Pedrosa, Igor Fernandes Gomes, Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos, Djalma Eusébio Simões Neto pelas sugestões valiosas por ocasião do exame de qualificação e da defesa da tese.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFRPE e do Departamento de Engenharia Civil, da UFPE, pelos conhecimentos transmitidos.

A Capes (Coordenação de pessoal de nível superior) pela concessão da bolsa durante o período de realização do doutorado.

A EECAC (Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina) por permitir a realização da pesquisa dentro de suas instalações e aos funcionários da EECAC Sr. Geraldo, Evanilson, Cosmo, Biró, Nital, Badé, Biu, Carpina, Salim, Zé, Vadinho por disponibilizarem seu tempo e conhecimentos me ajudando nesta pesquisa.

Aos estagiários, e futuros colegas de profissão, Heitor Trajano, Olímpio Arrouxellas, Ewerton Yuri e Thais Rocha pelo compromisso, assiduidade e eficiência durante a realização deste trabalho.

Aos amigos da disciplina de geoestatística Jucicleia, Thais, Carol, Alan, Betinho, Wellington, que rendeu muitos “causos”, fotos e parcerias. Aos amigos Igor, Renato, Thais, Patrícia, Mara e Adriana por se disporem a me ajudar quando precisei durante a execução de ensaios, qualificação e elaboração da tese. Aos demais amigos e amigas do Doutorado pela amizade e paciência.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização desta tese.

Muito obrigada!

RESUMO

O Estado de Pernambuco é um dos maiores produtores de açúcar e álcool do Nordeste e contribui para geração de empregos diretos e indiretos em áreas rurais e industriais. O solo é uma peça importante no sucesso da produção de cana-de-açúcar. O preparo da área em umidade inadequada, o uso excessivo de implementos agrícolas, o tráfego intenso de veículos cuja carga ultrapasse a capacidade de suporte do solo podem desagregar torrões além do necessário, criar camadas de impedimento para o crescimento das raízes, e impedir transporte de ar e água para as raízes das plantas. As causas e os efeitos da compactação sobre a qualidade estrutural do solo e sobre o rendimento das culturas apontam para práticas mais conservacionistas para manter a qualidade do solo. Em Pernambuco, foram investigadas as causas da compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, por meio de seus atributos físicos e mecânicos do solo, e a relação entre a produtividade da cana-de-açúcar. Por meio de análise de solo e cana-de-açúcar em diferentes períodos do ano e sob diferentes tratamentos de preparo do solo e diferentes variedades de cana-de-açúcar verificou-se que a tensão de pre-consolidação foi reduzida e que o preparo com grade e sulcador sob cultivo da variedade RB92 579 promoveu a maior redução entre tratamentos e entre períodos de cultivo. Pelo ajuste de um modelo para avaliar a capacidade de suporte do solo, verificou-se que o Argissolo, na maior parte da área, não se encontrava compactado. Houve decréscimo na RP após o preparo do solo até os 30 cm de profundidade, que corresponde à profundidade máxima de trabalho da haste do sulcador utilizado. Não se verificou diferença estatística na área mobilizada ou profundidade do perfil. Para a área estudada, a coesão e ângulo de atrito foram de 16,57 kPa e 38,84°, respectivamente. Pela análise multivariada, verificou-se que acima de 70% da variabilidade do conjunto de dados pode ser explicado pelas três primeiras componentes principais e que no círculo unitário, a coesão se encontra no mesmo quadrante de agentes cimentantes do solo (argila e carbono) e o atrito, por sua vez, no mesmo quadrante de areias, densidade do solo e agregados. O brix da variedade RB92 579 deferiu estatisticamente para os tratamentos empregados. Fracas correlações foram encontradas para os parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar e atributos do solo.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*, atributos físicos, cisalhamento do solo, tensão de pre-consolidação, compactação

ABSTRACT

The state of Pernambuco is one of the largest producers of sugar and ethanol in the Northeast and contributes to generation of direct jobs in rural and industrial areas. As a result, the soil is an important piece to influence the success of the production of sugarcane. The soil quality may be affected when its use is inappropriate or intensive. The preparation of the area in inadequate moisture, excessive use of agricultural implements, excessive traffic and traffic with vehicles whose load exceeds the soil bearing capacity can disaggregate clods than necessary, create hindrance layers for root growth and transport air and water to the roots of plants. Several authors investigate the causes and effects of compression on the structural quality of the soil and on crop yields and point to more conservation practices to maintain soil quality. In Pernambuco, we investigated the causes of compaction of a cohesive Ultisol cultivated with sugarcane, through its physical and mechanical properties, and the relationship between the productivity of sugarcane and soil properties. Through soil analysis and sugarcane at different times of year and under different tillage treatments and different varieties of sugarcane it was found that the preconsolidation stress was reduced and the preparation with grid and trencher under RB92 579 variety of cultivation promoted the greatest reduction between treatments and between periods of cultivation. By setting a model to evaluate the soil bearing capacity, it has been found that the soil in most of the area was not compressed. There was a decrease in RP after tillage to 30 cm deep, which is the maximum working depth of the plow rod used. There was no statistical difference in the deployed area or depth of the profile. For the study area, cohesion and friction were 16.57 kPa and 38.84° respectively. Multivariate analysis showed that over 70% of the data set of the variability of the first principal component and cohesion lies in the same quadrant cementing ground agents (clay and carbon) and the friction is the same quadrant sand, soil density and aggregates. The brix variety RB92 579 statistically granted to employees treatments. Weak correlations were found for the technological parameters of sugarcane and soil properties.

Keywords: *Saccharum spp.*, physical attributes, shear strength, preconsolidation stress, compaction

Lista de Figuras

CAPÍTULO II - Capacidade de suporte e atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes preparos

Figura 1. Pluviosidade de 2014 durante os meses de experimento.....	30
Figura 2. Representação gráfica da área e distribuição das parcelas na área experimental. P1 (gradagem+sulcador), P2 (sulcador), V1 (cana-de-açúcar variedade RB 867515), V2 (cana-de-açúcar variedade RB92579).....	32
Figura 3. Comparação da tensão de pré-consolidação para Argissolo Amarelo do Nordeste sob umidades de 10 e 19%.....	37
Figura 4. Tensão de pré-consolidação para T1 e para T2, subdividido entre os tratamentos para a profundidade 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B)	38
Figura 5. Tensão de pré-consolidação para T1 e para T2, subdividido entre os tratamentos para a profundidade 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B) e modelo ajustado de Dias Júnior (1994).....	40

CAPÍTULO III - Coesão e ângulo de atrito relacionados a atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Figura 1. Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Amarelo distrocoeso, obtidas com amostras de profundidade 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m.....	52
Figura 2. Tensão em função do deslocamento de um Argissolo Amarelo distrocoeso na profundidade para 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (b).....	53
Figura 3. Diagrama de ordenação unitária da primeira (D1) e segunda (D2) componente principal após a rotação Varimax (A), e da primeira (D1) e terceira (D3) componente principal após rotação Varimax (B) para a profundidade 0,00-0,20 m.....	55
Figura 4. Diagrama de ordenação unitária da primeira (D1) e segunda (D2) componente principal após a rotação Varimax, para a profundidade 0,20-0,40 m.....	56

CAPÍTULO IV - Estabilidade de agregados e resistência à penetração após mobilização de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Figura 1. Pluviosidade de 2014 durante os meses de experimento.....	63
Figura 2. Curva de retenção de água para um Argissolo Amarelo distrocoeso.....	63
Figura 3. Distribuição dos agregados para o T1 e T2 nas profundidades 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5%.....	69
Figura 4. Resistência à penetração agrupadas por tratamento. T1 - antes do preparo; P1 –grade e sulcador e cultivado; P2 –sulcador; V1 – solo cultivado com a variedade RB 867515; V2 – solo cultivado com a variedade V2 RB 92579.....	71
Figura 4. Resistência à penetração entre épocas em cada parcela. Os valores entre parênteses indicam a umidade a 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m respectivamente em que foram aferidas a RP.	72
Figura 5. Perfil natural e mobilizado de todas as parcelas estudadas da área de cultivo. P1 – sulcagem + gradagem; P2 – sulcagem; V1 - RB 867515; V2 –V2 RB 92579.....	74

CAPÍTULO V - Atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes preparos do solo

Figura 1. Diagrama de ordenação unitária da primeira (D1) e segunda (D2) componente principal	88
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Lista de Tabelas

CAPÍTULO II - Capacidade de suporte e atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes preparos

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar	32
Tabela 2. Valores médios dos atributos físicos, mecânicos e químicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso.....	35
Tabela 3. A análise de covariância de atributos do solo (0,00-0,20 m).....	36
Tabela 4. Valores médios da tensão de pré-consolidação (σ_p) e índice de compressibilidade (IC) nas umidades de 10%, 13%, 16% e 19%.....	36
Tabela 5. Ajuste logarítmico das tensões de pré-consolidação (kPa) e coeficiente de determinação para os diferentes tratamentos, em função da umidade.....	38
Tabela 6. Coeficiente de correlação de Pearson entre a tensão de pré-consolidação e os atributos do solo antes da renovação da área (T1).....	39
Tabela 7. Coeficiente de correlação de Pearson entre a tensão de pré-consolidação e os atributos do solo após a renovação da área (T2).....	39
Tabela 8. Tensão de pré-consolidação (kPa) em função da umidade do solo no momento do preparo (w_{prep})	41

CAPÍTULO III - Coesão e ângulo de atrito relacionados a atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Tabela 1. Caracterização física e química do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar.....	49
Tabela 2. Coesão (C), ângulo de atrito (ϕ) e tensão cisalhante (τ) nas quatro tensões normais (σ_n) de um Argissolo Amarelo distrocoeso	51
Tabela 3. Cargas fatoriais após a rotação Varimax para a profundidade 0,00-0,20 m.....	54
Tabela 4. Cargas fatoriais após a rotação Varimax para a profundidade 0,20-0,40 m.....	55

CAPÍTULO IV - Estabilidade de agregados e resistência à penetração após mobilização de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar	63
Tabela 2. Média da densidade do solo (D_s), em $g.m^{-3}$, umidade (w) em %, carbono orgânico (CO) em $dag.kg^{-1}$, resistência à penetração (RP), em MPa, diâmetro médio ponderado (DMP) em mm, módulo de finura (MF), em (%) para o período T1	68
Tabela 3. Média da densidade do solo (D_s), em $g.cm^{-3}$, umidade (w) em %, carbono orgânico (CO) em $dag.kg^{-1}$, resistência à penetração (RP), em MPa, diâmetro médio ponderado (DMP) em mm, módulo de finura (MF), em (%) para o período T2.....	68
Tabela 4. Resistência à penetração em função do preparo antes (T1) e após (T2)	70
Tabela 5. Profundidade do perfil e área mobilizada segundo os preparos do solo aplicados.....	73
Tabela 6. Correlação de Pearson entre área mobilizada, profundidade do perfil e atributos de um Argissolo Amarelo distrocoeso.....	74

CAPÍTULO V - Atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes preparos do solo

Tabela 1. Caracterização física e química do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar.....	82
Tabela 2. Média das variáveis tecnológicas das variedades de cana-de-açúcar RB86 7515 e RB92 579.....	85
Tabela 3. Valores médios de atributos de um Argissolo Amarelo distrocoeso antes do preparo (T1) e após o preparo (T2).....	85
Tabela 4. Correlação de Pearson entre as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar e atributos de um Argissolo Amarelo distrocoeso.....	86
Tabela 5. Percentagem da variância explicada pelos primeiros seis fatores	86
Tabela 6. Cargas fatoriais das variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar atributos do solo para os três primeiros fatores.....	87

Sumário

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	10
INTRODUÇÃO GERAL.....	12
CAPÍTULO I	
REVISÃO DE LITERATURA.....	13
Cana-de-açúcar.....	14
Solos agrícolas: preparo e área mobilizada.....	15
Compactação de solos agrícolas e crescimento de plantas.....	16
Atributos físicos e mecânicos para avaliar a compactação e a produtividade.....	17
Referências bibliográficas.....	22
CAPÍTULO II - Capacidade de suporte e atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes preparos	
Resumo	28
Abstract.....	28
Introdução.....	29
Material e Métodos.....	30
Resultados e Discussão.....	33
Conclusões.....	41
Referências Bibliográficas.....	42
CAPÍTULO III - Coesão e ângulo de atrito relacionados a atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso	
Resumo.....	47
Abstract.....	47
Introdução.....	48
Material e Métodos.....	49
Resultados e Discussão.....	51
Conclusões.....	56
Referências Bibliográficas.....	56
CAPÍTULO IV - Estabilidade de agregados e resistência à penetração após mobilização de um Argissolo Amarelo distrocoeso	
Resumo.....	60
Abstract.....	60
Introdução.....	61
Material e Métodos.....	62
Resultados e Discussão.....	67
Conclusões.....	75
Referências Bibliográficas.....	75
CAPÍTULO V - Atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes preparos do solo	
Resumo.....	80
Abstract.....	80
Introdução.....	81
Material e Métodos.....	82
Resultados e Discussão.....	84
Conclusões.....	88
Referências bibliográficas.....	88

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar começou a ser cultivada no Brasil no período colonial, e atualmente é uma das principais culturas para a economia brasileira, destacando-se na produção de açúcar e etanol, atendendo a demandas internas e externas. No Estado de Pernambuco, a agroindústria da cana-de-açúcar ocupa uma extensa área agrícola, contribuindo para uma relevante produção de açúcar e álcool, além de gerar empregos diretos nas áreas rurais e industriais.

O preparo do solo e a colheita mecanizada são empregados para incrementar a produção de insumos. Muitos estudos verificaram que excesso de preparo do solo e tráfego nas áreas de produção, muitas vezes conduzida sob condições inadequadas de umidade ou em um solo de baixa capacidade de suporte de carga, pode ocasionar a compactação do solo, o que repercute no desenvolvimento da cultura.

A tensão de pré-consolidação tem sido utilizada como uma importante ferramenta para manutenção da qualidade do solo. Por meio da tensão de pré-consolidação, pode-se definir a tensão máxima que o solo pode receber sem que sofra compactação adicional. Um outro dado, a resistência ao cisalhamento, ainda pouco estudado na área agrícola, é um importante indicador da resistência que o solo oferece quando está submetido a um carregamento ou deslocamento. Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, que compõem a resistência ao cisalhamento, são influenciados pelos contatos entre as partículas do solo os quais dependem tanto da geometria da partícula quanto de fatores que promovem maior ou menor proximidade entre estas partículas, como umidade e matéria orgânica.

O planejamento das operações de preparo do solo pode ser beneficiado com o conhecimento da carga que determinado solo poder suportar sem compactar, do efeito do preparo na qualidade estrutural do solo e dos agregados e da umidade ideal para trafegar no campo, pois servem como indicadores para o gerenciamento do manejo e para a manutenção da qualidade do solo. Neste sentido, justifica-se o conhecimento dos atributos físicos e mecânicos do solo em diferentes tipos de preparo e a resposta da cultura da cana-de-açúcar em função dos atributos do solo e o tipo de preparo, visto que a cultura pode apresentar maior rendimento e melhor qualidade para os produtores.

Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a compactação do solo por meio de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes tipos de preparo.

CAPÍTULO I

REVISÃO DE LITERATURA

REVISÃO DE LITERATURA

Cana-de-açúcar

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, pouco abaixo dos Estados Unidos, que utilizam o milho para sua produção (MARIN & NASSIF, 2013). Durante a safra 2011/2012, 571 milhões de toneladas de cana-de-açúcar colhidas produziram aproximadamente 36,9 milhões de toneladas de açúcar e cerca de 22,8 bilhões de litros de etanol. As estimativas para 2012/2013 são de 38,33 milhões de toneladas de açúcar e 23,64 bilhões de litros de etanol. A lavoura de cana-de-açúcar ainda está em expansão no Brasil e tem previsão de acréscimo de 408 mil ha impulsionado pela região Centro-Oeste e Sudeste. Essas duas regiões apresentaram acréscimo na produtividade da cana-de-açúcar tanto devido as condições climáticas que são mais favoráveis na porção central e sul do país como investimentos para recuperação e entrada de novas áreas (CONAB, 2013).

No Estado de Pernambuco a agroindústria da cana-de-açúcar ocupa uma extensa área agrícola, contribuindo para uma relevante produção de açúcar e álcool, além de gerar empregos diretos nas áreas rurais e industriais (SIMÕES NETO et al., 2012). A cultura da cana-de-açúcar é dependente de fatores, como a interação edafoclimática, o manejo da cultura e o tipo de solo, os quais desempenham importante papel no sucesso agrícola (MAULE et al., 2001).

No caso específico das variedades de cana-de-açúcar, duas são amplamente exploradas em Pernambuco, a RB86 7515 e a RB92 579. A variedade RB86 7515 apresenta o crescimento rápido, com maturação tardia, de alta produtividade agrícola. Esta variedade deve ser plantada em solos de média/baixa fertilidade e colhida em meados da safra ou bem no final, para explorar o rápido crescimento. Além disso, é tolerante à seca e tem-se adaptado bem aos solos arenosos (MARQUES & SILVA, 2008). Enquanto a variedade RB92 579 é muito produtiva, exigente em água, com colheita no meio da safra. Comparações realizadas por Ivo (2012) apontam que ao menos 50% da quantidade de raízes tende a se distribuir nos primeiros 20 cm da camada de solo, para ambas as variedades e que a RB86 7515 possui quantidade de raízes mais acentuada em cana crua se comparada com cana queimada e com a variedade RB92 579.

Por outro lado, o brix, a pol, a pureza são variáveis tecnológicas que medem a quantidade de sólidos solúveis, a sacarose em uma amostra e literalmente a pureza das massas da amostra de cana-de-açúcar e são variáveis que podem indicar a maturação. Estas variáveis tecnológicas podem sofrer alterações devido a atributos químicos do solo e a irrigação (FARIAS et al., 2009; MACEDO et al., 2012). Também se verificam que as propriedades físicas do solo podem influir na composição química e tecnológica e na produtividade da cana-de-açúcar (BANGITA & RAO, 2012; HORII, 2004).

Solos agrícolas: preparo e área mobilizada

O preparo do solo é definido como o revolvimento de camadas do solo e tem por objetivo fornecer um ambiente favorável para o crescimento das culturas e contribuir para o aumento da produtividade e redução de custos (HASAN, 2012; SOUZA, 2012). As técnicas de preparo do solo podem ser divididas entre 1) sistema reduzido ou conservacionista e 2) sistema convencional (MEDEIROS et al., 2009). A operação agrícola de preparo do solo tem por objetivo promover o rompimento do solo em torrões, descompactando-o e incorporando corretivos e fertilizantes além de incrementar os espaços porosos, a permeabilidade e o armazenamento de ar e água e controlar plantas daninhas (SANTIAGO & ROSSETTO, 2007).

Diversos implementos podem ser utilizados no preparo do solo, a grade aradora tem a função de preparar o solo, desestruturando-o, além de destruir soqueiras e plantas daninhas, e nivelando a superfície. O sulcador tem por finalidade abrir sulco no solo, delimitar o espaçamento das linhas de cultivo, bem como a largura e profundidade do sulco, propiciando condições ideais de germinação e crescimento inicial das culturas (VIZZOTTO, 2014). O sulcador é bastante utilizado para culturas de grande importância econômica como o milho e a cana-de-açúcar. Para o caso da cana-de-açúcar, o sulco pode ter profundidade de 30 a 40 cm e o dobro da largura, que é obtido com o uso de asas metálicas fixadas em cada lado da haste sulcadora, o que promove o deslocamento do solo para o lado, para cima e fora do sulco (BALASTREIRE, 1987). Ambos os implementos, por meio de sua interação com o solo, afetam nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e também nas características agrônômicas da cultura (FURLANI, 2000).

Todas as atividades de preparo do solo (gradagens em geral) deverão ser feitas com o mínimo de operações possível, evitando a ação pulverizadora das grades e a compactação

do solo solto com o pneu do trator e com os equipamentos (CARVALHO FILHO et al., 2007; SALVADOR et al., 2009). Frequentemente se observa na literatura o aparecimento de camada de impedimento no preparo convencional. Essas limitações afetam negativamente o rendimento agrícola e aumentam os custos de produção (BARZEGAR et al., 2006; SANTOS et al., 2005).

A mobilização afeta a agregação do solo, facilitando a lixiviação de nutrientes e o arrastamento de partículas pela água da chuva, além de promover a compactação do solo quando executado em umidade inadequada (MAGNO JÚNIOR, 2012). Do ponto de vista agrícola, o conhecimento das forças que atuam na interação entre ferramenta e solo é importante para a concepção de equipamentos mais eficazes de mobilização do solo (GODWIN & DOGHERTY, 2007), em que o tipo e o grau de mobilização são os principais fatores na seleção de equipamentos de preparo do solo.

A área mobilizada pode ser determinada por meio de gráficos plotados ou programas computacionais. O empolamento do solo fornece a expansão volumétrica ocorrida na mobilização e é medido pela relação entre a área de elevação e área mobilizada (ROSA et al., 2011). Quanto maior o empolamento, menor é a relação entre a área mobilizada de fundo com a de superfície, sendo de grande importância para adequar o tipo de preparo e equipamento a ser utilizado (GAMERO & SILVA, 1993).

Compactação de solos agrícolas e crescimento de plantas

No mundo, a compactação do solo é responsável por 4% (68,3 milhões de hectares) de degradação dos solos antropizados (OLDEMAN et al., 1991).

A compactação do solo é o processo através do qual há o decréscimo do espaço poroso com o incremento da densidade do solo (BESSON et al., 2013; PEDROTTI et al., 2001). Diferente da consolidação, a compactação do solo é um processo no qual um solo não saturado é comprimido por uma carga aplicada por um curto espaço de tempo sem que ocorra a expulsão da água (ALAKUKU, 2012), onde a carga rapidamente aplicada pode ser a do tráfego no campo, dos implementos de preparo ou do pisoteio animal. Sánchez-Girón (1996) verificou que a susceptibilidade a compactação pode variar conforme a intensidade e frequência de carga aplicada no solo.

A compactação do solo, resultante das operações de preparo de solo, aparecem entre 10 e 20 cm de profundidade e são perceptíveis na forma de uma camada endurecida

no solo após a passagem do implemento (ALVARENGA et al., 2012). As interações entre o solo e as máquinas e implementos que resultam na compactação subsuperficial podem ser analisadas tanto através de parâmetros inerentes ao solo como através de parâmetros inerentes as máquinas e ferramentas que atuam no solo (MACHADO, 2001). Tanto o preparo do solo, excessivo em uma única época ou preparos sucessivos ao longo dos anos, tem o potencial de destruir a estrutura natural do solo, reduzir a porosidade total, agregados e matéria orgânica do solo, o que expõem o solo a processo de compactação na subsuperfície e a processos erosivos na superfície (ESMAEILZADEH & AHANGAR, 2014).

Martins et al. (2013) verificaram que a mecanização proporcionou maior degradação do solo devido ao tráfego intenso de máquinas, cuja atividade é muitas vezes conduzida sob condições inadequadas de umidade ou em um solo de baixa capacidade de suporte de carga, o que poderá proporcionar a compactação do solo de forma prejudicial às culturas.

Algumas características do solo também contribuem para a ocorrência ou não da compactação, tais como a história de tensões, umidade, textura, estrutura, densidade e matéria orgânica. A geometria, continuidade e morfologia dos poros do solo, e em especial os macroporos, afetam em maior ou menor grau as propriedades do solo quando deformado (ALAKUKU, 2012; ROSA, 2007).

O aumento no nível da compactação no solo também contribui para o acréscimo da tensão de pré-consolidação e de cisalhamento e decréscimo do coeficiente de compressão, gerando uma condição adversa para o desenvolvimento da cultura (ROSA, 2007).

Atributos físicos e mecânicos para avaliar a compactação e a produtividade

Tensão de pré-consolidação

O estado de compactação do solo tem influência na sua capacidade de suporte de carga. A maior capacidade de suporte do solo se deve ao incremento da tensão de pré-consolidação, que ocorre quando o solo está num maior estado de compactação. Para Alakuku et al. (2003), a melhor estratégia de prevenção da compactação envolve a aplicação de tensões externas que não excedam a capacidade de suporte do solo, a qual pode ser estimada pela tensão de pré-consolidação. Da mesma forma, Fritton (2008) em

pesquisa sobre avaliação da pedotransferência e medidas para evitar a compactação, concluiu que a tensão de pré-consolidação é um parâmetro apropriado para estimar a tensão que pode ser aplicada no solo sem causar compactação adicional.

O ensaio de consolidação avalia a deformação do solo em função do tempo e a deformação total devido à variação do volume da amostra de solo. Solos que já receberam tensão vertical externa têm sua capacidade de suporte descrita por uma curva de compressão dividida em dois segmentos: uma parte curva, onde se descreve a compressão secundária do solo como elástica e reversível, pois a parte curva do gráfico representa a gama de tensões já experimentadas pelo solo no passado; uma parte reta, chamada de compressão virgem, onde as deformações são plásticas e, portanto, irreversíveis, pois a parte retilínea representa a gama de tensões ainda não experimentadas pelo solo (CAVALIERI et al., 2008).

O ponto que separa os dois segmentos da curva tensão-deformação do solo é chamado de capacidade de suporte do solo (σ_p). Assim, quando o solo é sujeito a esforços menores do que a tensão de pré-consolidação, este se deforma e se recupera elasticamente, ao longo da curva de recompressão. Inversamente, quando o solo é sujeito a esforços maiores que a tensão de pré-consolidação, o solo passa ao regime plástico e sofre compactação adicional (PACHECO & CANTALICE, 2011).

Braga et al. (2015) observou que Gleissolos apresentaram maior capacidade de suporte de carga que os Argissolos, quando na condição de capacidade de campo em área de pastagem; mas também observaram que os Argissolos estudados apresentaram semelhante comportamento em relação ao suporte de cargas, independentemente da sua posição na topossequência; em relação à textura, houve aumento da capacidade de suporte de carga com o acréscimo do teor de argila.

Resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito

A resistência do solo ao cisalhamento (τ) é um parâmetro dinâmico que representa a resistência que o solo oferece a uma força externa e é considerado o principal parâmetro explicativo da interação solo-máquina (BAVER et al., 1972; MCCORMACK & WILDING, 1979; MACHADO, 2001). Na agricultura, esse parâmetro cisalhamento pode contribuir na compreensão dos processos de patinação do solo, consumo de combustível, qualidade do preparo e estrutura do solo.

A resistência ao cisalhamento (τ) é definida como a tensão cisalhante máxima que o solo pode suportar sem se romper, isto é, a resistência ao cisalhamento é o limite de resistência à deformação oferecida por uma massa ou amostra de solo quando submetida a um carregamento ou deslocamento (HEAD, 1986).

A resistência ao cisalhamento pode ser expressa pela equação de Coulomb ($\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\phi$). Em que c representa a coesão do solo, e ϕ o ângulo de atrito. A resistência ao cisalhamento é dependente da distribuição, forma e tamanho das partículas sólidas, estrutura, densidade do solo (que afetam o parâmetro ϕ por aumentarem os pontos de contato do solo), argilominerais, tipo e quantidade de cátions trocáveis e forças de atração e repulsão entre as partículas, que afetam o parâmetro c . Dessa forma, espera-se que as alterações nos atributos do solo devido ao preparo do solo podem alterar os parâmetros de resistência ao cisalhamento. A densidade do solo altera o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas e os pontos de contato entre cada partícula, quanto maior for a densidade do solo, maior será o atrito e os pontos de contato. A umidade vem atuar nestas partículas de solo como um filme que reduz o atrito entre elas e, por conseguinte, reduzindo a resistência do solo (PACHECO & CANTALICE, 2011).

Chia et al. (2016) ao investigarem a resistência ao cisalhamento do solo, identificaram que as raízes contribuíram para o aumento da resistência ao cisalhamento. Barbosa & Lima (2012) verificaram que os parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos aumentaram com o tempo de plantio do capim vetiver, o que contribuiu para a estabilização de taludes.

Estabilidade de agregados e matéria orgânica do solo

Segundo Tormena et al. (2008), a resistência tênsil de agregados do solo pode ser definida como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados (DEXTER & WATTS, 2000) e pode ser utilizada como indicador dos efeitos do manejo na qualidade do solo, devido à resposta do solo aos processos físicos e mecânicos ligados a manipulação dos solos, como o preparo, a formação de crostas superficiais, a emergência de plântulas e a penetração radicular.

A matéria orgânica do solo é constituída por resíduos vegetais e animais em diversos estágios de decomposição. A matéria orgânica é tida como a base para a produtividade do solo porque promove no solo a fonte de recursos para a manutenção dos

microorganismos do solo, além de regular o fornecimento de água, ar e nutrientes para as plantas (ESMAEILZADEH & AHANGAR, 2014).

A matéria orgânica é diretamente afetada quantitativa e qualitativamente do manejo aplicado, sendo um indicador da degradação ou conservação dos solos sob cultivo agrícola (ROSA et al., 2011). A matéria orgânica pode interferir na resistência do solo através do (a) aumento da força de ligação entre partículas minerais; (b) aumento da elasticidade do solo, uma vez que materiais orgânicos podem apresentar altos índices de relaxação quando uma carga aplicada é aliviada; (c) diluição da densidade, já que a densidade dos materiais orgânicos é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo; (d) filamentos, como hifas de fungos e raízes, que 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; e (f) substâncias orgânicas, que retêm fortemente a água, podendo aumentar a fricção entre as partículas minerais (SOANE, 1990).

A manutenção da matéria orgânica incrementa a agregação do solo, protege seus agregados do impacto da gota de chuva e incrementa a estabilidade de agregados, melhora a infiltração de água e aeração do solo, reduz o escoamento superficial, melhora a capacidade de retenção de água, reduz a viscosidade de solos argilosos tornando-os mais fáceis de cultivar, reduz a formação de crostas superficiais, facilitando o preparo do solo (ESMAEILZADEH & AHANGAR, 2014). Esmailzadeh & Ahangar (2014), ao investigar a influência da matéria orgânica sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, apontam que práticas agrícolas levam ao empobrecimento progressivo dos teores de matéria orgânica no perfil do solo e, conseqüentemente, ocorre uma redução da produtividade inicial desses solos devido a um desequilíbrio químico.

Abdollahi et al. (2014) observaram que o incremento de matéria orgânica influencia a friabilidade do solo, protegendo-a do efeito da compactação em comparação com solo que apenas recebeu fertilizantes minerais, destacando que a matéria orgânica pode ajudar o solo a suportar melhor os efeitos do tráfego e preparo.

Umidade do solo

A água funciona como um lubrificante para as partículas do solo, que podem se reorganizar de acordo com a carga aplicada e assim apresentarem-se de forma dispersa. Na

curva de compactação, observa-se que a densidade do solo aumenta com o incremento de água no solo até que se alcance o teor de umidade crítico do solo, que corresponde à máxima compactação. Após este valor, que depende da textura específica de cada solo, a capacidade de compactação diminui visto que o solo encontra-se praticamente saturado e a água é incompressível (RICHARDT et al., 2005).

Quando o solo é preparado em umidades acima da ideal, haverá a produção de torrões maiores devido às deformações plásticas encontradas nesta umidade e um dano na estrutura do solo poderá ocorrer. Da mesma forma, se o solo está com umidade abaixo da ideal, grandes torrões poderão ser produzidos porque há pouca fragmentação do solo e ainda haverá um maior gasto de energia por parte dos tratores para preparar o solo devido à alta resistência mecânica apresentada pelo solo seco (MYRBECK et al., 2012).

Arvidsson & Bölenius (2006) observaram que a umidade ideal seria um valor intermediário muitas vezes relacionado a 90% do limite de plasticidade e ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo. Para estes autores, embora o limite de plasticidade seja bem satisfatório para solos sob condições ideais, ele não é recomendado para solos sem plasticidade. Por outro lado, o método que relaciona a umidade ótima de preparo do solo com da curva de retenção de água no solo estabelece o ponto de inflexão da curva de retenção como a umidade ótima para o preparo.

Quanto à relação dos parâmetros da cana-de-açúcar e os atributos do solo, o principal efeito da compactação do solo é observado no crescimento radicular, com consequências tanto para a parte aérea da planta como para a produtividade (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000; PRIMAVESI, 2002). Bengough et al. (2011), Kaiser et al. (2009), Lipiec (2012) verificaram também a influência da resistência do solo a penetração nas características bioquímicas e morfológicas das raízes e o crescimento de plantas. Tavares et al. (2010) verificaram que o perfilhamento da cana-de-açúcar é favorecido pelo preparo convencional, que o preparo do solo com arado de aiveca proporcionou melhores resultados tanto para o rendimento agrícola como industrial mas a aração e a subsolagem não influenciaram as características industriais da cana-de-açúcar (MENDONÇA et al., 2015), destacando-se que a produtividade favorável de acordo com o implemento usado também dependeu classe de solo, áreas com históricos próprios, diferentes níveis de compactação e teores de água.

Referências bibliográficas

- Abdollahi, L.; Schjønning, P.; Elmholt, S.; Munkholm, L. J. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. *Soil & Tillage Research*, v.136, p.28-37, 2014.
- Alakuku, L. Soil Compaction. In: Jakobsson, C. Sustainable agriculture ecosystem health and sustainable agriculture. Uppsala: Elanders, 2012, p.217-222.
- Alvarenga, R. C.; Cruz, J. C.; Albuquerque Filho, M. R. Manejo do solo – Preparo convencional do solo. Cultivo do Milho. Brasília: Embrapa, 2012 (Comunicado Técnico).
- Arvidsson, J.; Bölenius, E. Effects of soil water content during primary tillage-laser measurements of surface relief changes. *Soil & Tillage Research*, v.90, p.222-229, 2006.
- Balastreire, L. A. Máquinas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987. 310p.
- Bangita, B.; Rao, B. K. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma*, v.189–190, p.351–356, 2012.
- Barbosa, M. C. R. Lima, H. M. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.113-120, 2012.
- Barzegar, A. R.; Nadian, H.; Heidari, F.; Herbert, S. J.; Hashemi, A. M. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. *Soil & Tillage Research*, v.87, p.155-162, 2006.
- Baver, L. D.; Gardner, W. H.; Gardner, W. R. Soil physics. New York: 4th ed. John Wiley & Sons, 1972. 498p.
- Bengough, A. G.; Mckenzie, B. M.; Hallett, P. D.; Valentine, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, v.62, p.59-68, 2011.
- Besson, A.; Séger, M.; Giot, G.; Cousin, I. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma*, v.204–205, p.130–139, 2003.
- Braga, F. V. A.; Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Vogelmann, E. S.; Padrón, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1025-1035, 2015.
- Carvalho Filho, A.; Bonacim, J. L. G.; Cortez, J. W.; Carvalho, L. C. C. Mobilização de um

- Latosolo Vermelho acriférrico em função de preparo do solo. *Bioscience Journal*, v.24, p.1-7, 2008.
- Cavaliere, K. M. V.; Arvidsson, J.; Silva A. P.; Keller, T. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research*, v.98, p.17-26, 2008.
- Chia, C. F. Ming, H. T. Spatial distribution of plant root forces in root-permeated soils subject to shear, *Soil & Tillage Research*, v.156, p.1-15, 2016.
- CONAB, 2013 Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, abril/2013 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab 2013.
- Dexter, A. R.; Watts, C. Tensile strength and friability. In: Smith, K. Mullins, C. eds. *Soil and environmental analysis: Physical methods*. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 2000. p.401-430.
- Esmailzadeh, J. Ahangar, A. G. Influence of soil organic matter content on soil physical, chemical and biological properties. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, v.4, p.244-252, 2014.
- Farias, C. H. A.; Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Dantas Neto, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.419–428, 2009.
- Fritton, D. D. Evaluation of pedotransfer and measurement approaches to avoid soil compaction, *Soil & Tillage Research*, v.99, p.268–278, 2008.
- Furlani, C. E. Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*). Botucatu: UESP, 2000, 218p. Tese Doutorado.
- Gamero, C. A. Silva, J. G. Efeitos de ordens de gradagem e de sistemas de aração na camada mobilizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, Ilhéus, 1993. Anais... Ilhéus: CEPLAC/SBEA, 1993, p. 1536-1553.
- Godwin, R. J. O'Dogherty M. J. Integrated soil tillage forces prediction models. *Journal of Terramechanics*, v. 44, p.3–14. 2007.
- Gonçalves, W. G.; Severiano, E. C.; Silva, F. G.; Costa, K. A. P.; Guimarães Junnyor, W. S.; Melo, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a brazilian cerrado Latosol Growing sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.432-443, 2014.
- Hasan, A-H. A. Impact of tractor wheel passage during soil tillage on some soil characteristics and productivity of barely. *Journal of Applied Sciences Research*, v.8,

- p.3552-3562, 2012.
- Head, K. H. 1986. Manual of soil laboratory testing. London: ele interntional, 3v.
- Horii, J., 2004. A Cana-de-açúcar como matéria-prima. ESALQ - Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, Piracicaba.
- Ivo, W. M. P. M. Dinâmica da matéria orgânica em áreas de produção de cana-de-açúcar colhida crua e queimada, no Nordeste do Brasil. Recife: UFPE, 2012, 144p. Dissertação Mestrado.
- Kaiser, D. R.; Reinert, D. J. Reichert, J. M.; Collares, G. L.; Kunz, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.845-855, 2009.
- Lipiec, J.; Horn, R.; Pietrusiewicz, J.; Siczek, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. Soil & Tillage Research, v.121, p.74-81, 2012.
- Macedo, G. A. R.; Costa, E. L.; Viana, M. C. M. Características agronômicas e químicas das variedades de cana-de-açúcar RB83-5486 e RB86-7515 sob irrigação e sequeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, p.599–603, 2012.
- Machado, A. L. T. Previsão do esforço de tração para ferramentas de hastes com ponteiros estreitas em dois solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2001, 172p. Tese Doutorado.
- Magno Júnior, R. G. Avaliação de sistemas de preparo do solo para a cultura da cenoura (*Daucus carota L.*) visando à colheita mecanizada. Viçosa: UFV, 2012. 85p. Tese Doutorado.
- Marin, F. Nassif, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, p.232–239, 2013.
- Marques, T. A. Silva, W. H. Crescimento vegetativo e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v.8, p.54-60, 2008.
- Martins, P. C. C.; Dias Junior, M. S.; Carvalho, J. S.; Silva, A. R.; Fonseca, S. M. Levels of induced pressure and compaction as caused by forest harvesting operations. Cerne, v. 19, p. 83-91, 2013.
- Maule, R. F.; Mazza, J. A.; Martha, J. R. G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. Scientia Agrícola, v.58, p.295-301, 2001.

- Mccormack, D. E. Wilding, L. P. Soil properties influencing strength of cranfield and geeburg soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.43, p.167-73, 1979.
- Medeiros, G. A.; Daniel, L. A.; Lucarelli, J. R. F; Reis, F. A. G. V. Influência do sistema de preparo e manejo de um Latossolo Vermelho nas suas propriedades físico-hídricas. *Geociências*, v.28, p.453-465, 2009.
- Mendonça, M. F.; Araújo, W. P.; Júnior, C. C. P.; Chaves, L. H. G.; Silv, F. A. F. D. Preparo de solo e fosfatagem - II. Rendimento agrícola e industrial da cana-de-açúcar. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v.11, p.14-21, 2015.
- Myrbeck, Å.; Stenberg, M.; Arvidsson, J.; Rydberg, T. Effects of autumn tillage of clay soil on mineral N content, spring cereal yield and soil structure over time. *European Journal of Agronomy*, v.37, p.96-104, 2012.
- Oldeman, L. R.; Hakkeling, R. T. A.; Sombroek, W. G. World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note. Wageningen: The Netherlands/UNEP, 1991, 34p.
- Pacheco, E. P. Cantalice, J. M. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.417-428, 2011.
- Pedrotti, A.; Pauletto, E. A; Crestana, S.; Ferreira, M. M.; Dias Junior, M. S.; Gomes, A. S.; Turatti, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.521-529, 2001.
- Primavesi, A. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo: Nobel, 2002.
- Queiroz-Voltan, R. B.; Nogueira, S. S. S.; Miranda, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, p.929- 938, 2000.
- Richart, A.; Tavares Filho, J.; Brito, O. R.; Llanillo, R. F.; Ferreira, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. *Semina*, v.26, p.321-344, 2005.
- Rosa, C. M.; Castilhos, R. M. V.; Pauletto, E. A.; Pillon, C. N.; Leal, O. A. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1769-1776, 2011.
- Rosa, D. P. Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de

- escarificação e compactação. Santa Maria: UFSM, 2007. 122p. Dissertação Mestrado.
- Salvador, N.; Mion, R. L.; Benez, S. H. Consumo de combustível em diferentes sistemas de preparo periódico realizados antes e depois da operação de subsolagem. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, v. 33, p.870-874, 2009.
- Sánchez-Girón, V. *Dinámica y mecánica de suelos*. Madrid: Ediciones Agrotécnicas S. L., 1996. 426p.
- Santiago, A. D. Rossetto, R. Preparo convencional. Brasília, DF, 2007. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestorcana-de-acucar/CONTAG01_84_22122006154841.html> Acesso em 02 abr. 2014.
- Santos, G. A.; Dias Junior, M. S.; Guimarães, P. T. G.; Furtini Neto, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays L.*) cultivadas em solos distintos. *Ciência e Agrotecnologia*, v.29, p.740-752, 2005.
- Simões Neto, D. E.; Oliveira, A. C.; Rocha, A. T.; Freire, F. J.; Freire, M. B. G. S.; Nascimento, C. W. A. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.347–354, 2012.
- Soane, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research*, v.16, p.179-201, 1990.
- Souza, G. S. Controle de tráfego agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar. Campinas: FEAGRI, 2012. 114p. Dissertação Mestrado.
- Tavares, O. C. H.; Lima, E.; Zonta, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. *Acta Scientiarum*, v.32, p.61-68, 2010.
- Tormena, C. A.; Fidalski, J.; Rossi Júnior, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.33-42, 2008.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibility of a yellow Latosol under different management systems with sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525–536, 2012.
- Vizzotto, V. R. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora sobre os atributos físicos do solo em várzea no comportamento da cultura da soja (*Glycine max L.*). Santa Maria: UFSM, 2014. 78p. Tese Doutorado.

CAPÍTULO II

Capacidade de suporte e atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes preparos

Capacidade de suporte e atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes preparos

Resumo: O presente estudo teve como objetivos determinar as relações da tensão de pré-consolidação de um Argissolo Amarelo sob cultivo de cana-de-açúcar antes e após diferentes preparos empregados durante a renovação de área cultivada com cana-de-açúcar. Para isto, coletas foram realizadas em dois períodos: T1 – sem mobilização da área há 5 anos e T2 – após o preparo do solo, em duas profundidades: 0,00-0,20 m e 0,20-0,40m. As variáveis analisadas foram tensão de pré-consolidação (σ_p) em diferentes umidades, textura, densidade do solo (Ds), e limites de consistência. O índice de compressibilidade ensaiado a 19% de umidade foi sensível a interação entre sistema de preparo do solo e variedade de cana-de-açúcar. A σ_p foi reduzida com o preparo do solo. Sob a umidade aferida durante o preparo, a σ_p variou de 126,10 a 62,66 kPa, destacando-se a importância da umidade na capacidade de suporte de carga do solo.

Palavras-chave: tensão de pré-consolidação, atributos físicos, preparo do solo

Carrying capacity and physical properties of a Ultisol distrocoeso cultivated with sugarcane in different tillage

Abstract: This study aimed to determine the tension of relations pre-consolidation of a Ultisol distrocoeso under sugarcane cultivation before and after different preparations used during the sugarcane renovation areas. For this, samples were taken in two periods: T1 - without mobilizing the area for 5 years and T2 - after preparing the soil in two depths: 0.00 to 0.20 m and 0.20-0.40m. The variables analyzed were voltage pre-consolidation (σ_p) in different moisture, texture, bulk density (Ds), consistency limits to check the soil compaction state and the effect of the preparation. The compressibility index tested at 19% moisture content was sensitive to treatment preparation and variety. The σ_p was reduced with soil preparation. Under moisture during the preparation, carrying capacity and physical properties of a Ultisol cultivated with sugarcane in different tillage σ_p ranged from 126.10 to 62.66 kPa, highlighting the importance of moisture in the soil load bearing capacity.

Key words: pre-consolidation stress, cohesive soils, soil compaction, tillage, soil structure

Introdução

Para suprir a demanda por alimentos e atender o gerenciamento de grandes extensões de terra, o sistema de produção agrícola tem se intensificado com preparo do solo e colheita mecanizada (HASAN, 2012; VISCHI FILHO et al., 2015). Neste processo, o preparo do solo mal gerenciado tem deteriorado a estrutura do solo provocando sua compactação, o que repercute no desenvolvimento da cultura (BRAGA et al., 2015; LIPIEC et al., 2012; MARTINS et al., 2013). No mundo, a compactação do solo é responsável por 4% (68,3 milhões de hectares) de degradação dos solos antropizados (OLDEMAN et al., 1991).

A compactação do solo é o processo através do qual há o decréscimo do espaço poroso com o incremento da densidade do solo (BESSON et al., 2013; PEDROTTI et al., 2001). Quando resultante das operações de preparo de solo, tendem a aparecer entre 10 e 20 cm de profundidade e são perceptíveis na forma de uma camada endurecida no solo após a passagem do implemento (ALVARENGA et al., 2012). O processo de compactação está ligado à estrutura, textura, umidade e matéria orgânica do solo, e a ação externa de preparo do solo e às cargas aplicadas no solo pelo tráfego de veículos.

Associado a isto, a tensão de pré-consolidação define a capacidade de suporte de carga que o solo pode suportar sem que ocorra compactação adicional (BRAGA et al., 2015; VASCONCELOS et al., 2012). Quando a carga aplicada pelos rodados dos veículos ultrapassa a tensão de pré-consolidação medida no solo, pode ocorrer a compactação do solo (VISCHI FILHO et al., 2015).

Nos ensaios de compressibilidade, os solos têm sua capacidade de suporte descrita por uma curva de tensão-deformação dividida em dois segmentos: uma parte curva, onde se descreve a compressão secundária do solo como elástica e reversível, pois a parte curva do gráfico representa a gama de tensões já experimentadas pelo solo no passado; uma parte reta, chamada de compressão virgem, onde as deformações são plásticas e, portanto, irreversíveis, pois a parte retilínea representa a gama de tensões ainda não experimentadas pelo solo (CAVALIERI et al., 2008).

O ponto que separa os dois segmentos da curva tensão-deformação do solo é chamado de tensão de pré-consolidação (σ_p) e define a capacidade de suporte do solo. Assim, quando o solo é sujeito a esforços menores do que a tensão de pré-consolidação este se deforma e se recupera, ao longo da curva de recompressão, quando o solo é sujeito

a esforços maiores que a tensão de pré-consolidação, o solo passa ao regime plástico e sofre compactação adicional (PACHECO & CANTALICE, 2011).

Por meio da tensão de pré-consolidação, Silva et al. (2005) verificaram variação na capacidade de suporte do solo em função da estação chuvosa ou seca, e Vischi Filho et al. (2015) verificaram variação causados pelos ciclos de cultivo e dos restos culturais. Assis & Lanças (2005) afirma que a capacidade de suporte varia com a profundidade do solo, o que torna o estudo deste parâmetro relevante para o gerenciamento de preparos e tráfego de veículos em áreas de cultivo.

O presente estudo teve como objetivos determinar a capacidade de suporte e as relações da tensão de pré-consolidação e atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso sob diferentes preparos do solo e diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), situada no Município de Carpina, PE; em um Argissolo Amarelo distrocoeso, com área de 0,88 ha, situado nas seguintes coordenadas 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco. A precipitação durante a condução do experimento foi obtida por meio de estação meteorológica da EECAC (Figura 1).

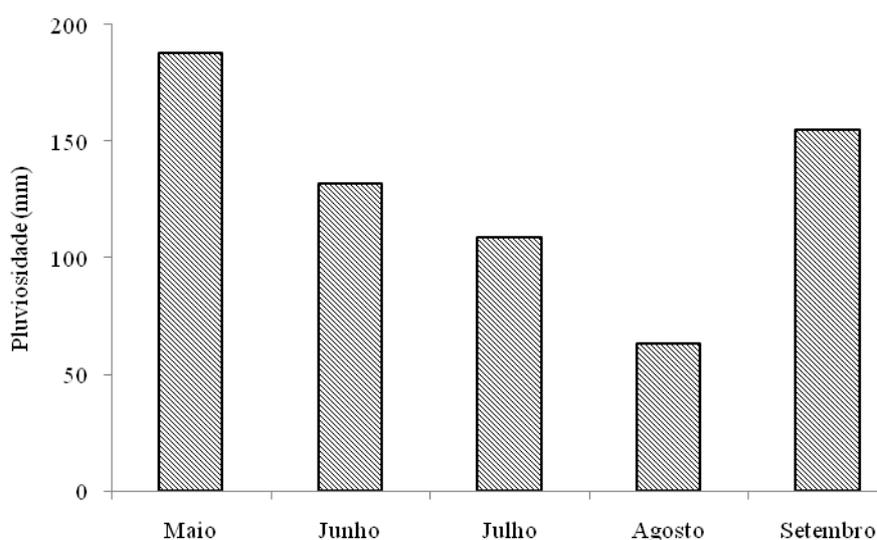


Figura 1. Pluviosidade do ano de 2014 durante os meses de experimento

A área experimental (Figura 2) apresenta formato retangular e foi dividida em 16 parcelas, de dimensões $26,00 \times 16,00$ m, com espaçamento entre parcelas de 2,00 m para a coleta do solo para análises de atributos físicos e mecânicos. Em cada parcela foi coletada amostra na profundidade 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, totalizando 16 amostras por camada. Para a variável tensão de pré-consolidação foram coletadas amostras indeformada para quatro diferentes umidades (10, 13, 16 e 19%) em cada uma das 16 parcelas, totalizando 64 amostras por camada.

Os procedimentos de coleta de amostras de solo foram realizadas em dois períodos distintos: antes da renovação da área (T1) e após a renovação (T2). Antes da renovação, a área havia sido cultivada com cana-de-açúcar por 5 anos e as coletas para este período (T1) foram realizadas em maio e junho de 2014. Na seqüência, a área foi renovada com aplicação de dois tipos de preparo de solo e o plantio de duas variedades de cana-de-açúcar, em agosto de 2014. As coletas após a renovação da área (T2) ocorreram setembro de 2014.

Para o período após a renovação da área (T2), a análise de variância foi realizada em delineamento blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com 4 repetições. Nas parcelas foram aplicados dois tipos de preparo do solo: P1 – gradagem e sulcador e P2 – Sulcador; e nas subparcelas, duas variedades de cana-de-açúcar: V1 - RB 867515 e V2 RB 92579 (Figura 2). As análises de variância e de correlação linear entre as variáveis foram efetuadas, usando o pacote estatístico SAS, versão 9.2 (SAS INSTITUTE, 2008). Quando necessário efetuou-se comparação de médias entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os dados de T1 e T2 foram submetidos à análise de covariância. Para verificar que o pressuposto da Homocedasticidade foi atendido, foi aplicado o Teste de Bartlett, onde se constatou homogeneidade dos dados para todas as variáveis completas, fazendo uso do programa Assistat. A normalidade dos dados foi verificada pelos testes de Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors e Shapiro-Wilk.

A densidade (D_s) e umidade gravimétrica (w) foram realizadas por meio de amostrador de Uhland com anel volumétrico de 0,05 m de altura e 0,02 m de diâmetro, segundo metodologia da EMBRAPA (1997). A textura foi determinada pelo densímetro de Boyoucos, com dispersão de 50 g de terra fina seca ao ar com 25 ml de hexametáfosfato de sódio tamponado com carbonato de sódio. A areia foi separada por tamisação, enquanto a argila por sedimentação e o silte por diferença, conforme da EMBRAPA (1997). Os limites

de liquidez (LL) e plasticidade (LP) foram realizados conforme a norma NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984b), respectivamente; enquanto o índice de plasticidade (Ip) foi obtido por diferença.

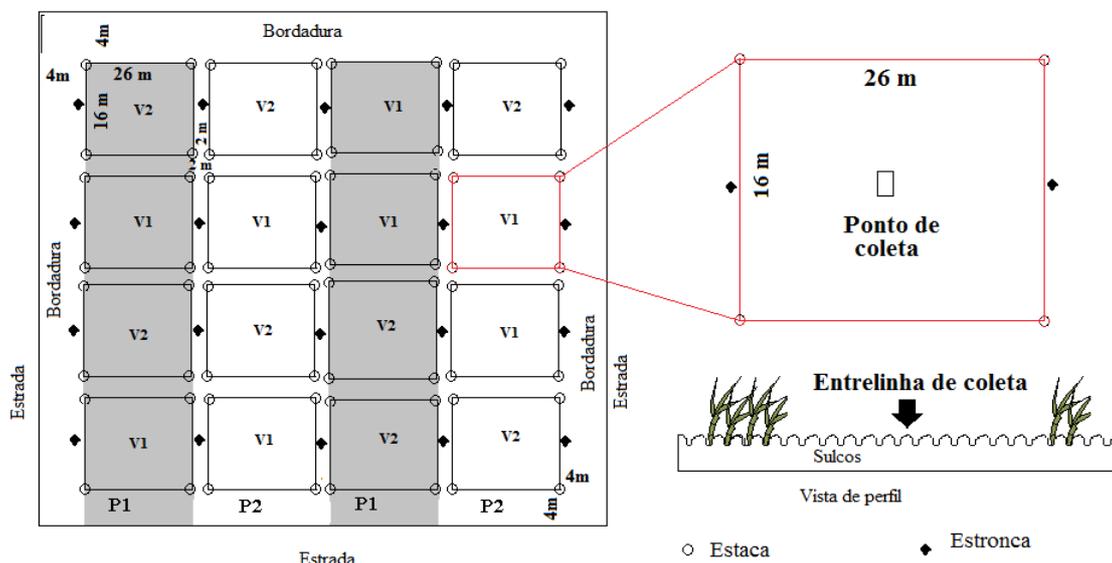


Figura 2. Representação gráfica da área e distribuição das parcelas na área experimental. P1 (gradagem+sulcador), P2 (sulcador), V1 (cana-de-açúcar variedade RB 867515), V2 (cana-de-açúcar variedade RB 92579)

Na renovação da área, foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade no momento que os sulcos foram abertos (w_{prep}), na profundidade média de abertura do sulco (aproximadamente 15 cm) (Tabela 1). O ensaio de Carbono orgânico (CO) foi realizado segundo EMBAPA (1997).

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar

	Argila	Areia fina	Areia grossa	Silte	Lp	Ll	Ip	w_{prep}
	g. kg ⁻¹	g. kg ⁻¹	g. kg ⁻¹	g. kg ⁻¹	%	%	%	%
0,00-0,20 m								
T1	127,50	216,14	516,13	139,20	16,3	20,4	4,0	
T2	133,33	212,80	506,00	142,50	16,245	20,49	4,245	13,74
0,20-0,40 m								
T1	129,33	219,60	504,93	143,63	16,03	20	3,97	
T2	146,25	206,13	530,50	117,13	16,18	21,595	5,42	

Lp – limite de plasticidade; Ll – limite de liquidez; Ip – índice de plasticidade; w_{prep} – umidade do solo durante o preparo

O ensaio de compactação foi realizado conforme NBR 7182 (ABNT, 1986) - ensaio de Proctor normal. Após o ensaio a curva de compactação foi elaborada para a obtenção da densidade seca máxima ($D_{s_{máx}}$) e umidade crítica ($w_{crít}$). O grau de compactação do solo

(GC) foi determinado pela relação entre a densidade do solo e a densidade máxima de compactação, obtida no ensaio de Proctor normal. A profundidade máxima dos sulcos, por ocasião do preparo, foi verificada com o auxílio de um perfilômetro, conforme descrito em Carvalho Filho et al. (2008).

A compressibilidade do solo foi avaliada em amostras com estrutura preservada, coletadas em anéis metálicos de 0,025 m de altura e 0,065 m de diâmetro, nas duas profundidades, conforme NBR 12007/90. As amostras foram submetidas a tensões correspondentes aos conteúdos de água médios de: 0,1; 0,13; 0,16 e 0,19 kg kg⁻¹. Durante o ensaio foram aplicadas as cargas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, com duração de aplicação de carga de 30, 60 e 120 segundos, conforme descrito em Macedo et al. (2010).

Para a determinação da tensão de pré-consolidação nas umidades de 10% (σ_{p10}), 13% (σ_{p13}), 16% (σ_{p16}) e 19% (σ_{p19}) e índice de compressibilidade nas umidades de 10% (IC10), 13% (IC13), 16% (IC16) e 19% (IC19), utilizou-se o programa Compress 1.0, optando-se pela curva de Pacheco Silva para a determinação da tensão de pré-consolidação (REINERT et al., 2003).

Na elaboração do modelo de capacidade de suporte de carga, foram utilizadas 12 amostras indeformadas dos ensaios de tensão de pré-consolidação para ajuste ao modelo não linear, $\sigma_p = 10^{(a+b \times U)}$ (DIAS JUNIOR, 1994), em que: σ_p é a tensão de pré-consolidação do solo; a e b são os parâmetros de ajuste do modelo e U é a umidade do solo. Determinou-se o intervalo de confiança, a 95%, dos modelos de capacidade de suporte de carga, e as três regiões propostas por Dias Júnior et al. (2005).

Resultados e Discussão

O Argissolo estudado foi caracterizado como de textura franca arenosa nas duas profundidades. Em relação os limites de consistência, o IP indica que o solo é fracamente plástico (IP<7), contudo, houve incremento do limite de liquidez em comparação com o T1, na profundidade 0,20-0,40 m, o que resultou no incremento do IP nesta profundidade. Todas as observações distribuíram-se em áreas que classificam o solo como SF (areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte) e SC (Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila), segundo a carta de plasticidade. Verificou LP de 16%, enquanto Braida (2004) e Mota et al. (2008) não verificaram plasticidade para outros Argissolos Amarelos de tabuleiros costeiros.

A DP variou de 2,66 a 2,76 g.cm⁻³, segundo Buckman e Brady (1974), na maior parte dos solos minerais a densidade de partícula varia de 2,6 a 2,7 g.cm⁻³, o que reflete a grande influência da presença dominante do quartzo, que apresenta peso específico de 2,65 g.cm⁻³ (Tabela 2).

A Ds aumentou com a profundidade e este resultado pode estar relacionado a teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, menor penetração de raízes, maior compactação ocasionada pelo peso das camadas subjacentes, diminuição da porosidade total devido à eluviação de argila, dentre outros. Houve decréscimo da Ds após a renovação da área, provavelmente devido ao revolvimento do solo promovido pela grade aradora e o sulcador.

Os resultados observados para Ds corroboram os observados por Costa et al. (2014) e Simões Neto et al. (2015) que estudaram Argissolos Amarelos com textura franca a franco arenosa. Houve redução da porosidade com a profundidade e houve incremento da Pt do período T1 para o T2.

A umidade do solo aumentou com a profundidade, provavelmente devido à evaporação da água na superfície do solo. O decréscimo da umidade de T1 para T2 está ligado a fatores climáticos, com maiores índices pluviométricos em T1 que em T2 (Figura 1).

Pela análise de variância aplicada ao período T2, não se observou diferença estatística para os tratamentos, exceto Ds_{máx}, na profundidade 0,00-0,20 m. Após a renovação da área, na profundidade 0,00-0,20 m, a interação de preparo e variedade foram a causa de variação para a Ds_{máx}, em que P2V2 diferiu de P2V1 e P1V2 (Tabela 2). Ds_{Max} de P1V1 não diferiu dos demais. Em outras pesquisas, a Ds_{máx} variou de 1,87 a 1,95 g.cm⁻³ para Argissolos Amarelos e fatores como textura do solo incrementando a Ds_{máx} com o incremento do teor e areia. O resultado da w_{crit} indica que a máxima densidade do solo pode ser alcançada quando o solo estiver em umidade de 11 a 13%, recomendando-se tráfego de veículos abaixo desta umidade como forma de prevenir compactação adicional na área (Tabela 2). A w_{crit} foi incrementada com o teor e argila (BRAIDA, 2004; CORDEIRO NETO, 2012; OLIVEIRA et al., 2010). Em uma mesma energia de compactação maiores teores de areia proporcionam acréscimos de Ds_{Max} com pouco incremento de água, e maiores teores de argila proporcionam menores valores de Ds_{Max} obtido com elevado incremento de água.

Tabela 2. Valores médios dos atributos físicos, mecânicos e químicos de um Argissolo Amarelo ditrocoeso

	DP		DS		w		Pt		Ds _{máx}		w _{crit}		GC		CO	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
0,00-0,20 m																
P1V1	2,73	2,63a	1,46	1,34a	12,03	9,97a	46,32	49,46a	1,81	1,84ab	11,94	12,06a	80,85	73,15a	1,83	1,57a
P1V2	2,72	2,75a	1,47	1,39a	10,98	9,43a	45,72	49,70a	1,83	1,87a	11,66	11,44a	80,50	74,56a	1,38	1,55a
P2V1	2,74	2,66a	1,48	1,37a	12,82	11,23a	45,86	48,50a	1,82	1,88a	11,84	10,88a	81,79	73,91a	1,70	1,64a
P2V2	2,73	2,69a	1,34	1,34a	12,14	12,35a	50,93	49,70a	1,84	1,82b	11,44	12,19a	73,11	73,31a	1,90	1,65a
0,20-0,40 m																
P1V1	2,74	2,67a	1,60	1,58a	13,27	12,83a	41,48	41,54a	1,83	1,78a	11,79	13,46a	87,37	85,41a	1,50	1,35a
P1V2	2,72	2,73a	1,64	1,53a	13,03	12,40a	39,65	44,77a	1,86	1,83a	10,97	13,19a	88,28	82,82a	1,43	1,29a
P2V1	2,72	2,67a	1,60	1,60a	13,84	12,48a	41,10	40,21a	1,83	1,80a	12,86	12,98a	87,69	88,59a	1,50	1,26a
P2V2	2,75	2,74a	1,63	1,56a	13,21	12,35a	40,30	42,80a	1,80	1,85a	11,74	12,10a	88,75	84,67a	1,50	1,35a

DP - Densidade de partículas; Ds - Densidade do solo; w - umidade do solo; Pt - Porosidade total; Ds_{máx} - Densidade seca máxima; w_{crit} - umidade crítica; GC - Grau de compactação; CO - Carbono orgânico; P1 - gradagem + sulcagem; P2 - sucagem; V1 - RB86 7515; V2 - RB92 579; T1 - antes do preparo; T2 - Após o preparo

O valor de GC nas duas profundidades reduziu com o revolvimento do solo promovido pelos preparos do solo, destacando-se maior redução em P1V1. Por ser uma medida gerada da relação entre Ds e DP, o GC é muito influenciado pela variação da Ds em função de uma densidade de referência (DP) e é útil para a caracterização do estado de compactação de diferentes solos. O GC acima de 86% apresentado em T1 pode ser prejudicial ao desenvolvimento e rendimento das culturas, segundo a classificação de Linstrom & Voorhess (1994).

Pela análise de covariância, apenas Ds_{máx}, Ds, w, Pt apresentaram diferença estatística entre os períodos T1 e T2, na camada 0,00-0,20 m (Tabela 3). O tratamento foi a causa de variação de Ds_{máx}, não se observando variação entre os tempos ou a interação. A Ds_{Max} é uma variável que está mais relacionada a textura e matéria orgânica, que pouco variaram entre os tempos T1 e T2. A variação da Ds e Pt entre os tempos pode ser atribuída a renovação da área que ao revolver o solo, modificou sua estrutura. A causa de variação da w foi o tempo e pode ser explicada pelos fatores climáticos diferentes no momento da coleta de amostras de solo.

Antes da renovação da área (T1), observa-se incremento da tensão de σ_p com a profundidade, e redução com o incremento da umidade. Para T2, verifica-se redução da σ_p com o incremento da umidade. O revolvimento do solo por meio do preparo, e o incremento da umidade promoveram redução da σ_p , condições que favorecem a susceptibilidade a compactação do solo, verificado no incremento em IC (Tabela 4). Vischi

Filho et al. (2015) atribuem o decréscimo da σ_p com o aumento da umidade ao manejo que induz a desagregação e a um menor contato entre as partículas primárias do solo.

Tabela 3. A análise de covariância de atributos do solo (0,00-0,20 m)

	$D_{s_{máx}}$ ^a	
	F	Pr>F
Antes do preparo	0,35	0,5649 ns
Tratamento	8,47	0,0131*
Antes*tratamento	0,84	0,3761 ns
Ds		
	F	Pr>F
Antes do preparo	0,05	0,8345 ns
Tratamento	5,49	0,0372*
Antes*tratamento	5,61	0,0354*
w		
	F	Pr>F
Antes do preparo	8,88	0,0115*
Tratamento	3,68	0,0792 ns
Antes*tratamento	1,22	0,2916 ns
Pt		
	F	Pr>F
Antes do preparo	0,12	0,7364 ns
Tratamento	5,13	0,0429*
Antes*tratamento	5,28	0,04*

$D_{s_{máx}}$ - Densidade seca máxima; Ds - Densidade do solo; w - umidade do solo; Pt - Porosidade total; Tratamento - Preparo do solo (P1- sulcador e grade; P2 - sulcador); Antes*tratamento - interação entre medição inicial e tratamento. * - significativo pelo teste F a 5%; ns - Não significativo pelo teste F a 5%

Tabela 4. Valores médios da tensão de pré-consolidação nas umidades de 10% (σ_{p10}), 13% (σ_{p13}), 16% (σ_{p16}) e 19% (σ_{p19}), em kPa, e índice de compressibilidade nas umidades de 10% (I_{C10}), 13% (I_{C13}), 16% (I_{C16}) e 19% (I_{C19})

	σ_{p10}		I_{C10}		σ_{p13}		I_{C13}		σ_{p16}		I_{C16}		σ_{p19}		I_{C19}	
	T1	T2	T1	T2												
0,00-0,20 m																
P1V1	124,45	76,43a	0,10	0,10a	85,88	66,92a	0,16	0,14a	136,58	56,08a	0,19	0,22a	83,72	58,75b	0,20	0,20a
P1V2	139,51	96,31a	0,10	0,11a	227,12	59,32a	0,14	0,14a	63,11	57,47a	0,16	0,16a	54,90	41,27ab	0,18	0,20a
P2V1	124,06	161,10a	0,11	0,10a	90,77	92,69a	21,64	9,38a	102,39	55,76a	3,76	0,16a	74,13	61,71a	0,20	0,32a
P2V2	152,26	115,38a	0,10	0,11a	118,91	61,85a	0,14	0,14a	88,39	73,88a	0,16	0,17a	40,22	59,79ab	0,30	0,18a
0,20-0,40 m																
P1V1	124,22	164,71a	0,13	0,17a	-	101,05a	-	0,94a	170,61	94,51a	0,16	0,50a	126,06	44,80a	0,20	0,20a
P1V2	136,80	110,54a	0,10	0,10a	137,32	93,33a	0,13	0,13a	108,51	102,90a	0,17	0,16a	94,74	63,17a	0,19	0,19a
P2V1	240,47	181,72a	10,78	8,86a	146,97	107,10a	0,19	0,17a	202,15	104,77a	3,44	3,95a	91,63	132,95a	0,39	6,02a
P2V2	204,19	133,00a	0,14	0,10a	224,76	133,64a	0,12	0,13a	141,01	111,44a	0,16	0,15a	95,00	107,42a	0,21	0,22a

T1- Antes do preparo do solo; T2 - Após o preparo do solo

Não se observou diferença estatística para as variáveis de tensão de pré-consolidação. Apenas no índice de compressibilidade referente ao ensaio com 19% de umidade (I_{C19}) verificou-se diferença estatística para a interação preparo e variedade de

cana-de-açúcar (Tabela 4). Verificou-se que a σ_p apresentou os resultados semelhantes aos de Iori et al. (2012), Lima (2013), Lozano et al. (2013), Mion et al. (2013), Oliveira et al. (2011), Pacheco & Cantalice (2011). Exceção é observada para a umidade de 10%, em que a σ_p de P1V1 apresentou valor abaixo dos demais, e para o tratamento P2V2 após o preparo cuja σ_p ficou acima dos citados autores (Figura 3).

De T1 para T2 houve redução de σ_p para todos os tratamentos da umidade 13 e 16%, nas duas profundidades. O mesmo comportamento se observou na umidade de 19%, apenas na profundidade 0,00-0,20m. Para a umidade de 10%, na profundidade 0,00-0,20 m, houve variação de resultados, com incremento de σ_p nos tratamentos P1V1 e P2V1 se comparados a T1. A variação nos resultados pode ser devido a processos pedogenéticos e a ação antrópica da agricultura que contribuem para a heterogeneidade do solo (VERONESE JÚNIOR et al., 2006), principalmente em pesquisa de campo (Figura 4).

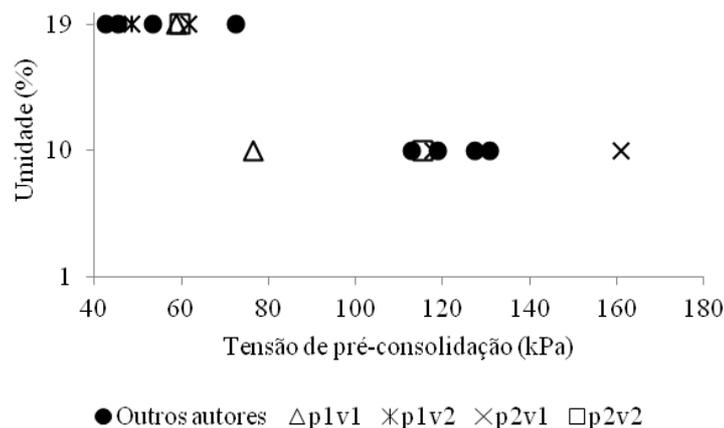


Figura 3. Comparação da tensão de pré-consolidação para Argissolo Amarelo do Nordeste sob umidades de 10 e 19%

Os melhores ajustes são observados na tensão de pré-consolidação de T1 e no tratamento P1V1 que apresentaram os melhores coeficientes de determinação (Tabela 5).

Em T1, a σ_p correlacionou-se negativamente com a Argila e o CO na superfície, e positivamente com a Argila e CO na subsuperfície. σ_p correlacionou-se positivamente com Areia fina, Areia grossa e Silte, nas duas profundidades. Correlação negativa foi observada em L_p para todas as condições de umidade de σ_p (Tabela 6).

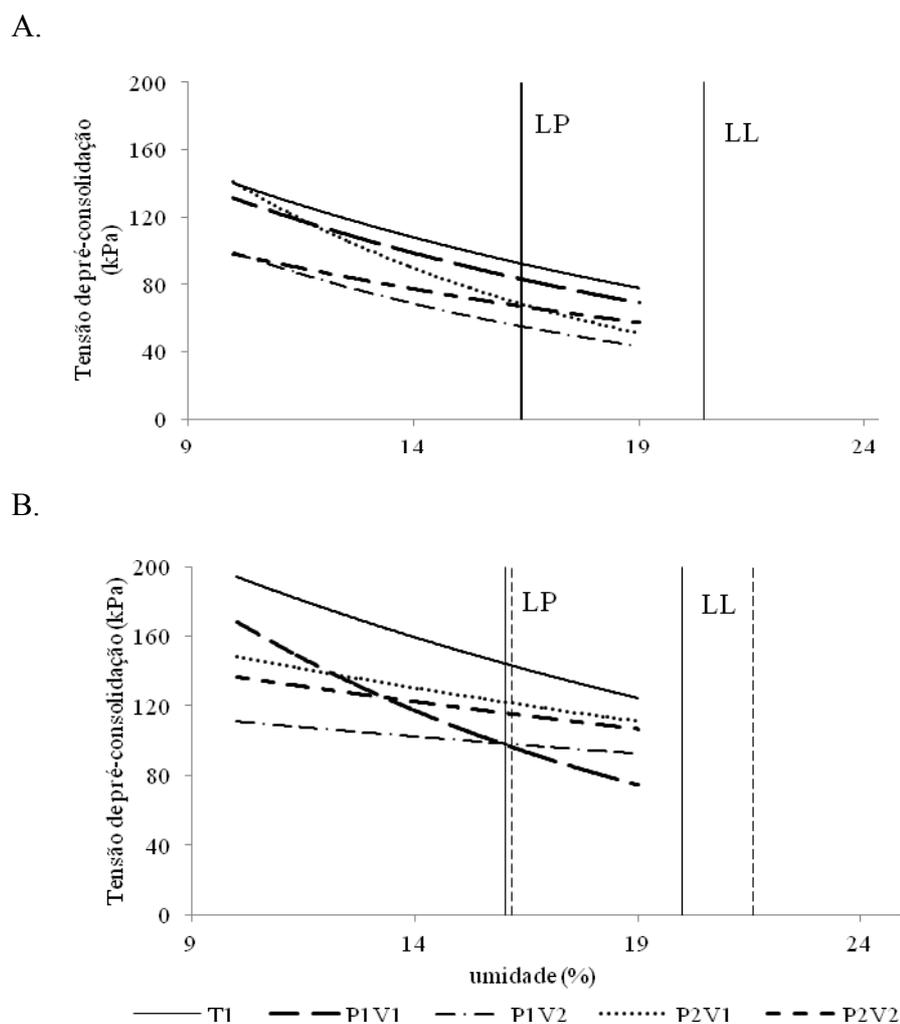


Figura 4. Tensão de pré-consolidação para T1 e para T2, subdividido entre os tratamentos para a profundidade 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B)

Tabela 5. Ajuste logarítmico das tensões de pré-consolidação (kPa) e coeficiente de determinação para os diferentes tratamentos, em função da umidade

Tratamento	Equação da reta	Coefficiente de determinação
0,00-0,20 m		
T1	$y = 269,35e^{-0,065x}$	$R^2 = 0,9625$
P1V1	$y = 267,6e^{-0,071x}$	$R^2 = 0,9365$
P1V2	$y = 247,31e^{-0,092x}$	$R^2 = 0,7874$
P2V1	$y = 435,16e^{-0,113x}$	$R^2 = 0,8235$
P2V2	$y = 178,37e^{-0,06x}$	$R^2 = 0,5869$
0,20-0,40 m		
T1	$y = 318,01e^{-0,049x}$	$R^2 = 0,8444$
P1V1	$y = 416,34e^{-0,09x}$	$R^2 = 0,8775$
P1V2	$y = 135,78e^{-0,02x}$	$R^2 = 0,1787$
P2V1	$y = 204,02e^{-0,032x}$	$R^2 = 0,2347$
P2V2	$y = 179,72e^{-0,027x}$	$R^2 = 0,851$

P1 – Sulcagem e gradagem; P2 – Sulcagem; V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579

Tabela 6. Coeficiente de correlação de Pearson entre a tensão de pré-consolidação e os atributos do solo antes da renovação da área (T1)

	Argila	Areia fina	Areia grossa	Silte	Ds _{máx}	w _{crit}	GC	Lp	Ll	Ip	CO
0,00-0,20 m											
σp10	-0,62	-0,70	0,57	0,33	0,22	-0,54	-0,71	-0,51	0,37	0,46	0,37
σp13	-0,60	0,40	0,38	0,00	0,80	-0,65	-0,16	-0,81	-0,33	0,09	-0,31
σp16	-0,17	0,71	-0,30	0,21	-0,35	0,04	0,07	-0,09	0,09	0,12	-0,09
σp19	-0,09	0,76	-0,47	-0,11	0,40	-0,35	-0,21	-0,25	0,18	0,27	-0,43
0,20-0,40 m											
σp10	-0,30	-0,19	0,75	-0,51	0,01	0,07	0,23	-0,64	-0,73	-0,27	0,32
σp13	0,76	0,99	-0,79	0,27	-0,05	0,54	0,00	-0,15	-0,20	-0,13	0,33
σp16	0,12	0,06	0,06	0,07	0,08	-0,11	-0,13	-0,44	0,00	0,38	-0,27
σp19	-0,07	0,42	-0,34	0,27	0,31	0,79	-0,18	0,44	0,22	0,16	0,46

Ds_{máx} - Densidade seca máxima; w_{crit} - umidade crítica; GC - Grau de compactação; CO - Carbono orgânico; Lp - limite de plasticidade; Ll - limite de liquidez; Ip - índice de plasticidade

Em T2, σp também se correlacionou negativamente com argila e CO, na profundidade 0,00-0,20 m e positivamente na profundidade 0,20-0,40 m. σp correlacionou-se positivamente com areia fina e silte, nas duas profundidades. Com a areia grossa, houve correlação positiva com σp apenas na camada 0,00-0,20m. σp correlacionou-se positivamente com GC e negativamente com Ll nas duas profundidades (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficiente de correlação de Pearson entre a tensão de pré-consolidação e os atributos do solo após a renovação da área (T2)

	Argila	Areia fina	Areia grossa	Silte	Ds _{máx}	w _{crit}	GC	Lp	Ll	Ip	CO
σp10	-0,60	0,24	0,26	0,45	0,71	-0,53	-0,32	0,21	-0,15	0,04	0,39
σp13	-0,32	0,20	0,04	0,72	0,47	-0,67	0,58	0,01	-0,28	0,07	-0,38
σp16	-0,31	-0,25	0,44	-0,08	-0,29	-0,14	0,38	-0,37	-0,10	0,26	-0,38
σp19	-0,35	0,06	0,17	-0,05	0,05	0,43	0,82	0,28	-0,32	-0,55	-0,02
0,20-0,40 m											
σp10	0,10	0,41	-0,51	0,31	-0,37	0,47	0,23	-0,11	-0,37	-0,26	0,17
σp13	0,23	0,37	-0,60	0,17	-0,29	0,19	0,21	0,03	-0,16	-0,16	0,13
σp16	0,08	0,06	-0,11	0,04	0,22	-0,12	0,38	-0,20	-0,13	0,04	0,31
σp19	-0,01	0,24	-0,11	0,00	0,36	-0,28	0,34	-0,26	-0,40	-0,17	0,19

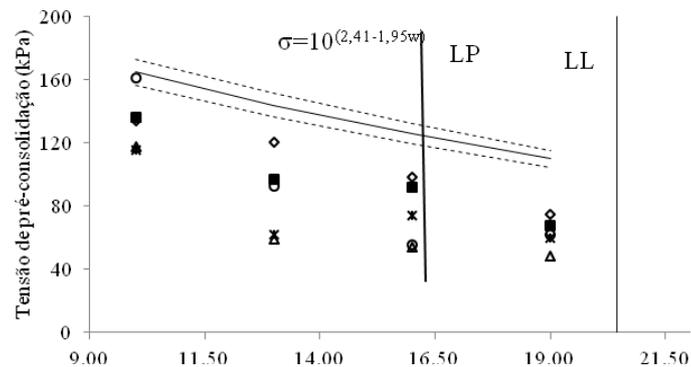
Ds_{máx} - Densidade seca máxima; w_{crit} - umidade crítica; GC - Grau de compactação; CO - Carbono orgânico; Lp - limite de plasticidade; Ll - limite de liquidez; Ip - índice de plasticidade

O conjunto com os resultados da σp observadas no campo, nos dois períodos, e nos tratamentos é apresentado na Figura 5 juntamente com o modelo de capacidade de suporte de Dias Júnior (2004). Lp e Ll foram adicionados para ilustrar a faixa de plasticidade do solo. Como os resultados dos limites de consistência foram próximos na profundidade 0,00-0,20 m, assumiu-se um único valor para representar os períodos T1 e T2. Na profundidade 0,20-0,40 m, o limite dos dois períodos encontra-se discriminado na Figura 5. Segundo as técnicas de Dias Júnior (2004) para estimativa da capacidade de suporte do solo, verifica-se que a maior parte da área estudada não se encontra compactado, pois as

estimativas da σ_p para os tratamentos nas umidades estabelecidas estão abaixo do intervalo de confiança de 5% do ajuste do modelo, nas duas profundidades estudadas. Exceção se observa para σ_p 10 em P2v1 na profundidade 0,00-0,20 m e para σ_p 16 em T1 na profundidade 0,20-0,40 m, que se encontram entre os intervalos de confiança, que indica que o solo está sob risco de compactar.

Lozano et al. (2013), Oliveira et al. (2011), ao estudarem a tensão de pré-consolidação (σ_p) sob diferentes condições de manejo e umidade de Argissolos, detectaram que há um decréscimo na capacidade de suporte do solo com o acréscimo de umidade, o que tornou o solo mais susceptível a compactação em umidades mais elevadas. Em estudos de Argissolo Amarelo, Lozano et al. (2013) verificou que os veículos utilizados no canal ultrapassavam a capacidade de suporte do solo, mesmo em condições mais secas. A carga aplicada durante o tráfego foi maior que a tensão máxima a que o solo foi submetido em toda sua história, proporcionando incremento no estado de compactação do solo.

A.



B.

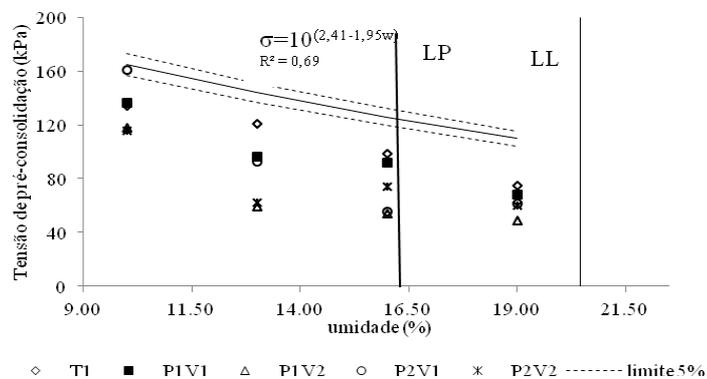


Figura 5. Tensão de pré-consolidação para T1 e para T2, subdividido entre os tratamentos para a profundidade 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B) e modelo ajustado de Dias Júnior (1994)

Souza (2012) indica que solos mais secos apresentam menos deformação e por consequência, compactam menos, porém nesta condição o solo apresenta maior resistência ao tratamento mecânico. Para a umidade ideal do solo, a área de pressão máxima é encontrada na área de aração, quando as deformações do solo são razoáveis, a resistência ao tratamento mecânico ser mínimo. Não se recomenda o manejo com o solo muito úmido, devido ao incremento nas tensões do solo decorrente da umidade, da mesma forma há incremento nas tensões de cisalhamento durante o manejo do solo.

A umidade é um dos fatores que determinam a magnitude da deformação que pode ocorrer no solo, pois age como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas. Porém, não apenas a umidade pode influenciar na capacidade de suporte do solo. O teor de água e o acúmulo de matéria orgânica no solo são dois fatores que influenciam fortemente no comportamento do solo em relação à susceptibilidade à compactação (LARSON et al., 1980; SILVA et al., 2000).

Na Tabela 8 é apresentada a umidade no momento do preparo. Foram simuladas tensões de pré-consolidação com as equações dos ajustes da σ_p x umidade da Tabela 6. Por este resultado pode-se estimar que a capacidade de suporte do solo no momento do preparo variou de 81,33 a 102,95 kPa e que cargas aplicadas no solo acima das tensões estimadas aumentam o risco de compactação adicional.

Tabela 8. Tensão de pré-consolidação (kPa) em função da umidade do solo no momento do preparo (w_{prep})

w_{prep}	P1V1	P1V2	P2V1	P2V2
Média (13,79%)	102,95	74,82	100,63	81,33

P1 – gradagem + sulcagem; P2 – sucagem; V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579

Para Alakuku et al. (2003), a melhor estratégia de prevenção da compactação envolve a aplicação de tensões externas que não excedam a capacidade de suporte do solo, a qual pode ser estimada pela tensão de pré-consolidação. As soluções apontadas por Hamza & Anderson (2005) são a investigação da compactação e da matéria orgânica, o tráfego controlado, a profundidade de corte do solo, a minimização do pisoteio, a investigação o desenvolvimento das raízes das plantas.

Conclusões

1. A σ_p foi reduzida após o preparo;

2. O tratamento P1V2 promoveu a maior redução entre tratamentos e entre períodos.
4. Houve diferença estatística para o Ic19.
5. Houve diferença estatística entre os períodos de preparo para Ds, D_{Smáx}, w e Pt.
6. O modelo de capacidade de suporte distinguiu áreas no intervalo de risco de compactar.

Referências Bibliográficas

- Alakukku, L.; Weisskopf, P.; Chamen, W. C. T.; Tijink, F. G. J.; Van Der Linden, J. P.; Pires, S.; Sommer, C.; Spoor, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research*, v.73, p.45-160, 2003.
- Assis, R. L. Lanças, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.515-522, 2005.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12007: Solo. Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7182: Solo. Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- Braga, F. V. A.; Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Vogelmann, E. S.; Padrón, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1025-1035, 2015.
- Braida, J. A. Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 107p. Dissertação Mestrado.
- Carvalho Filho, A.; Centurion, J. F.; Silva, R. P.; Furlani C. E. A.; Carvalho L. C. C. Soil & tillage methods: alterations in the roughness of the soil. *Engenharia Agrícola*, v.1, p.229-237, 2007.

- Cordeiro Neto, A. T. Efeito da compactação do solo e da vinhaça no desenvolvimento inicial e nutrição da cana-de-açúcar parasitada por nematoides. Recife, UFRPE, 2012. 67p. Dissertação Mestrado.
- Costa, D. B.; Andrade, P. K. B.; Silva, S. A. M.; Simões Neto, D. E.; Freire, F. J.; Oliveira, E. C. A. Adubação fosfatada em cana planta e soca em Argissolos do Nordeste de diferentes texturas. *Revista Caatinga*, v.27, p.47-56, 2014.
- Dias Júnior, M. S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994.114p. Tese Doutorado.
- Dias Junior, M. S.; Leite, F. P.; Lasmar Junior, E.; Araújo Junior, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. *Scientia Agricola*, v.62, p.248-255, 2005.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: centro nacional de pesquisa de solos, 2.ed., 1997. 212p.
- Hamza, M. A.; Anderson, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, v.82, p.121–145, 2005.
- Hasan, A-H. A. Impact of tractor wheel passage during soil tillage on some soil characteristics and productivity of barely. *Journal of Applied Sciences Research*, v.8, p.3552-3562, 2012.
- Iori, P.; Silva, R. B.; Dias Júnior, M. S.; Lima, J. M. Preconsolidation pressure as a tool for sustainability analysis of soil structure of soil classes under different uses. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1448–1456, 2012.
- Larson, W. E.; Gupta, S. C.; Useche, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of American Journal*, v.44, p.450-457, 1980.
- Lima, R. P. Modelos de capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo distrocoeso. Recife, UFRPE, 2013. 58p. Dissertação Mestrado.
- Lindstrom, M. J.; Voorhees, W. B. Response of temperate crops in North America to soil compaction. In: Soane, B. D. Ouwkerk, C. van (eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. London: Elsevier, 1994. cap.12, p.265-286.
- Lipiec, J.; Horn, R.; Pietrusiewicz, J.; Siczek, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species, *Soil & Tillage Research*, v.121, p.74-81, 2012.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of

- soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v.129, p.61–68, 2013.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.812-818, 2010.
- Martins, P. C. C.; Dias Junior, M. S.; Carvalho, J. S.; Silva, A. R.; Fonseca, S. M. Levels of induced ressure and compaction as caused by forest harvesting operations. *Cerne*, v.19, p.83-91, 2013.
- Mion, R. L.; Pereira, V. P.; Sombra, W. A.; Andrade, R. R.; Cordeiro, I. M.; Nunes, K. G. Preconsolidation of Ultisol subjected to the traffic of agricultural tractors. *Revista Ciências Agrárias*, v.56, p.69-72, 2013.
- Mota, J. C. A.; Assis, R. N.; Amaro Filho, J.; Libardi, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p.49-58, 2008.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.435–442, 2011.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F. B.; Cota, Y. D.; Pedrosa, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.914–920, 2010.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.417-428, 2011.
- Reinert, D. J.; Robaina, A. D.; Reichert, J. M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade do solo e seus parâmetros. In: Congresso Brasileiro de Ciência Do Solo. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD ROM
- Silva, V. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.239-249, 2000.
- Simões Neto, D. E.; Oliveira, A. C.; Freire, F. J.; Freire, M. B. G. S.; Oliveira, E. C. A.; Rocha, A. T. Adubação fosfatada para cana planta em solos representativos para o

- cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.73-81, 2015.
- Souza, G. S. Controle de tráfego agrícola e seus efeitos nos atributos do solo e na cultura da cana-de-açúcar. Campinas: FEAGRI, 2012. 114p. Dissertação Mestrado.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibility of a yellow Latosol under different management systems with sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525–536, 2012.
- Veronese Junior, V. V.; Carvalho, M. P.; Dafonte, J.; Freddi, O. S.; Vazquez, E. V.; Ingaramo, O. E. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil & Tillage Research*, v.85, p.166–177, 2006.
- Vischi Filho, O. J.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Lima, C. C.; Pereira, D. M. G.; Lima, M. E. L.; Sousa, A. C. M.; Souza, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.322-332, 2015.

CAPÍTULO III

Coesão e ângulo de atrito relacionados a atributos físicos de um Argissolo

Amarelo distrocoeso

Coesão e ângulo de atrito relacionados a atributos físicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Resumo: O presente estudo teve como objetivo quantificar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (ϕ e c) de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar e sua relação com atributos físicos do solo. O experimento foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), localizada no Município de Carpina, PE, em uma área de renovação da cana-de-açúcar cultivada há mais de 5 anos. Realizaram-se análises de densidade do solo (Ds), textura, carbono orgânico (CO) e ensaios de cisalhamento direto para obtenção da coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ) em amostras indeformadas, submetidas a tensões normais de 3, 4, 5 e 6 kPa. Verificou-se para a profundidade 0,00-0,20 m coesão e atrito de 16,82 kPa e 40,02°, respectivamente. Para a profundidade 0,20-0,40 m, coesão e atrito de 14,86 kPa e 39,65°, respectivamente. Em comparação com atributos físicos, verificou-se relação positiva entre coesão e as variáveis CO e argila, nas duas camadas estudadas.

Palavras-chaves: resistência ao cisalhamento, estatística multivariada, carbono orgânico

Cohesion and friction angle related to physical attributes of a Ultisol

Abstract: This study aimed to quantify the shear strength parameters (ϕ and c) a Ultisol cultivated with sugarcane and its relationship with soil physical properties. The experiment was conducted at the Experimental Station of sugarcane of Carpina (EECAC / UFRPE), located in the city of Carpina, PE, in a renovated area of sugarcane cultivated for five years. There were the direct shear tests on undisturbed samples, subjected to normal stresses of 3, 4, 5 and 6 kPa in flooded condition and analysis of soil bulk density (Ds), texture and organic carbon (CO). It was found from 0.00 to 0.20 m depth for the cohesion and friction 40.02° and 16.82 kPa, respectively. For the depth 0.20-0.40 m, cohesion and friction 39.65° and 14.86 kPa, respectively. Compared to physical attributes, a positive relationship was verified between cohesion and CO variables and clay, in the two layers studied.

Key words: shear strength, principal components, soil physical, organic carbon

Introdução

A indústria da cana-de-açúcar ocupa uma extensa área agrícola, contribuindo para uma relevante produção de açúcar e álcool, além de gerar empregos diretos nas áreas rurais e industriais, no Estado de Pernambuco (SIMÕES NETO et al., 2012). A cultura da cana-de-açúcar é dependente de fatores, como a interação edafoclimática, o manejo da cultura, o tipo de solo, os quais desempenham importante papel no sucesso agrícola (MAULE et al., 2001).

Em termos de paisagem, muitas destas áreas destinadas a produção da cana-de-açúcar encontram-se cultivadas em solos de tabuleiros costeiros, que ocorrem ao longo da costa brasileira, a classificação do solo varia bastante, com predominância dos Latossolos (OLIVEIRA, 2008) Argissolos, Espodosolos e Neossolos quartzarênicos (SOBRAL et al., 2008). Alguns dos solos podem ser classificados como coesos devido a fatores climáticas e relevo que favorecem a formação deste tipo de horizonte. O comportamento de solos coesos é de consistência dura a muito dura, quando secos, e friável quando úmidos. Além disso, o caráter coeso pode influenciar negativamente o desenvolvimento da planta e as operações de preparo do solo, o que compromete a produtividade e a demanda de energia para a mecanização.

A resistência do solo ao cisalhamento (τ) é um parâmetro dinâmico que representa a resistência que o solo oferece a uma força externa e é considerado o principal parâmetro explicativo da interação solo-máquina (BAVER et al., 1972; MCCORMACK & WILDING, 1979; e MACHADO, 2001). Na agricultura, esse parâmetro cisalhamento pode contribuir na compreensão dos processos de patinação do solo, consumo de combustível, qualidade do preparo e estrutura do solo.

A resistência ao cisalhamento pode ser expressa pela equação de Coulomb ($\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\phi$). Em que c representa a coesão do solo e ϕ o ângulo de atrito do solo. A resistência ao cisalhamento depende da distribuição, forma e tamanho das partículas sólidas, estrutura, densidade do solo (que afetam o parâmetro ϕ por aumentarem os pontos de contato do solo), argilominerais, tipo e quantidade de cátions trocáveis e forças de atração e repulsão entre as partículas (que afetam a c) (PACHECO & CANTALICE, 2011). Dessa forma, espera-se que as alterações nos atributos do solo devido ao preparo podem alterar os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Em alguns casos, os solos não possuem um comportamento fácil de ser descrito dificultando seu estudo, devido ser um material heterogêneo (BIRIS & VALENTIN, 2012), e ser influenciado pela complexa estrutura do solo, a umidade do solo e a intensidade, frequência e duração das tensões aplicadas no solo (KELLER et al., 2013). Para estes casos, a análise multivariada tem contribuído para a interpretação dos resultados. Rodrigues Júnior et al. (2013) estabeleceu em sua pesquisa atributos para explicar a variância dos parâmetros de qualidade de cana-de-açúcar, brix, pol e fibra. Nas análises multivariadas se considera a correlação entre as variáveis e estas são tratadas simultaneamente, para verificar as relações e efeitos mútuos entre as variáveis.

Desta forma, o objetivo do presente estudo foi o de quantificar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, atrito (ϕ) e coesão (c) de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar e sua relação com atributos físicos do solo.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), situada no Município de Carpina, PE. O estudo foi realizado em um Argissolo Amarelo distrocoeso, classificado como franco arenoso (Tabela 1), e se situa nas seguintes coordenadas 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco.

Tabela 1. Caracterização física e química do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar

	Argila	Areia Fina	Areia Grossa	Silte	Ds	Pt	GF	GC	LP	LL	pH _{CaCl}	pH _{água}	CO
0,00-0,20 m	127,50	216,14	516,13	139,20	1,49	45,40	43,10	80,37	16,39	21,02	4,22	5,01	1,68
0,20-0,40 m	129,33	219,60	504,93	143,63	1,65	39,35	32,23	89,37	16,09	20,03	4,11	4,88	1,50

Ds – densidade do solo (g.cm⁻³); Pt – porosidade (%); GF – grau de flocculação (%); GC – grau de compactação (%); Lp – limite de plasticidade (%); Ll – limite de liquidez; CO – carbono orgânico (dag.kg⁻¹)

O estudo consistiu da coleta de amostras para análises de atributos físicos, mecânicos e químicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar por 5 anos. As coletas foram realizadas em maio e junho de 2014.

A área experimental apresentava formato retangular dividida em 16 parcelas experimentais de 26,00×16,00 m e com espaçamento entre parcelas de 2,00 m, totalizando 0,88 ha. Em cada parcela foi coletada uma amostra na profundidade 0,00-0,20 m e uma

amostra na profundidade 0,20-0,40 m, totalizando 32 amostras para cada atributo do solo estudado.

Trincheiras foram escavadas para extração de blocos de solo com dimensões de 20×20×20 cm, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m. Cada bloco foi parafinado e acondicionado em caixas de madeira e transportado para o Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos - UFRPE para realização do ensaio de cisalhamento direto e obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno do solo; com auxílio de prensa de cisalhamento direto, marca Solotest. Para cada bloco, realizaram-se 4 ensaios com as tensões normais de 3, 4, 5 e 6 kPa, determinados em função do peso específico do solo e profundidade da amostra de 0,20 e 0,40 m (STOKES & MATTHECK, 1996), que simulam os níveis médios de tensões geostáticas verticais efetivas para o solo estudado.

Na fase de consolidação, as leituras foram realizadas aos 0,06; 0,25; 0,5; 1, 2, 4; 8; 15; 30; 60; 90 e 120 minutos, com a amostra sendo saturada aos 0,5 minutos. A velocidade mínima aplicada pelo equipamento foi de 0,30 mm/minuto. Na fase de cisalhamento, as leituras foram realizadas a cada 30 segundos nos primeiros 5 minutos, e a cada 1 minuto a partir do quinto minuto. Os ensaios foram realizados até a máxima deflexão do extensômetro horizontal (10 mm).

A coesão e o ângulo de atrito foram obtidos com o ajustamento da equação de Coulomb ($\tau = c + \sigma_n \tan \phi$) para os valores de tensão de cisalhamento obtidos com aplicação das tensões normais, pelo método dos mínimos quadrados.

A densidade (D_s) foi determinada por meio do amostrador de Uhland com o anel volumétrico de 0,05 m de altura e 0,02 m de diâmetro; enquanto a umidade gravimétrica (w) segundo metodologia da EMBRAPA (1997). A textura foi determinada pelo densímetro de Boyoucos. A areia foi separada por tamisação, enquanto a argila por sedimentação e o silte por diferença, conforme da EMBRAPA (1997). Os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) foram realizados conforme a norma NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984b), respectivamente; enquanto o índice de plasticidade (IP) foi obtido por diferença. O grau de compactação do solo (GC), ensaio de carbono orgânico (CO), pH, grau de floculação (GF), agregados do solo foram realizados segundo norma da EMBRAPA (1997).

Após verificar a normalidade dos dados, e observação de valores significativos na matriz de correlação ($>0,30$) para coesão e atrito, os dados foram submetidos a análise

multivariada de componentes principais. A análise multivariada foi empregada para determinar relações entre atrito e coesão e atributos físicos do solo, utilizando a rotação do eixo varimax normalizada para melhor interpretação dos resultados. Como resultado da análise de componentes principais, grande parte da variabilidade contida no conjunto de variáveis originais se concentra em um número reduzido de fatores.

Resultados e Discussão

A coesão e o ângulo de atrito foram maiores na camada 0,00-0,20 m. A umidade de saturação foi de 28% (Tabela 2). Silva & Carvalho (2007) verificaram menor ϕ com a profundidade devido a maiores teores de argila na subsuperfície, que revestem as partículas de areia reduzindo o atrito. O mesmo comportamento pode ser verificado no presente estudo no diagrama de ordenação unitária, em que atrito e coesão posicionam-se em quadrantes opostos (Figura 3).

Tabela 2. Coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e tensão cisalhante (τ) nas quatro tensões normais (σ_n) de um Argissolo Amarelo distrocoesos

	c (kPa)	ϕ (°)	----- τ (kPa)-----			
			$\sigma_n=3$ kPa	$\sigma_n=4$ kPa	$\sigma_n=5$ kPa	$\sigma_n=6$ kPa
0,00-0,20 m	16,57	38,84	18,7	19,4	22,7	20,7
0,20-0,40 m	14,86	39,65	17	18,3	20,4	20,2

σ_n – tensão normal

As envoltórias de resistência ao cisalhamento, para todas as tensões, apresentaram relação positiva com a tensão normal (Figura 1). Resultado semelhante foi observado por Braida et al. (2007). Pouca diferença é observada entre as profundidades para a τ , c ou ϕ . Para o solo areno siltoso estudado por Barbosa & Lima (2013), verificou-se τ de 38 kPa sob tensão normal (σ_n) de 50 kPa. Também foi verificado incremento de 167% na coesão com o plantio de capim vetiver que serviu de fonte para aumentar o teor de matéria orgânica do solo.

A tensão normal e umidade são os fatores de maior influência na variação do ângulo de atrito e da coesão (SILVA et al., 2007). Outros fatores como o tipo de preparo do solo, como semeadura direta, escarificação e tráfego (ROSA, 2007), textura, estrutura, conteúdo de matéria orgânica, densidade, mineralogia e (MAZURANA, 2009) também interferem em c e ϕ , pois interferem na maior ou menor tensão cisalhante.

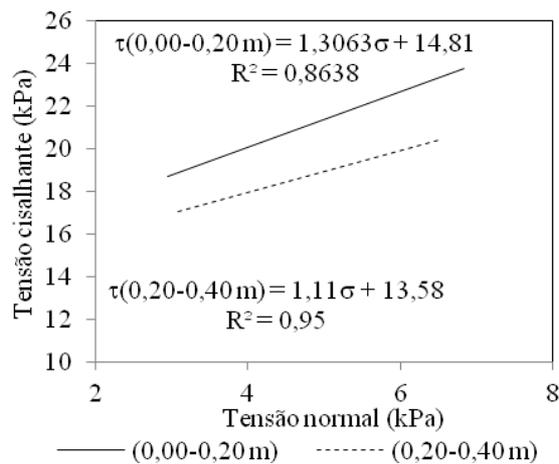


Figura 1. Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Amarelo distrocoeso, obtidas com amostras de profundidade 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m

Para Silva et al. (2014) verificaram que ϕ diminui quando o solo passa do estado compacto a solto e de friável a plástico, observando ϕ de 38° a 40°, para solos compostos por areias com partículas médias, e ϕ de 32° a 35° quando compactado. A coesão e ângulo de atrito de Argissolo Amarelos de tabuleiros costeiros foram objeto de estudo para Braida et al. (2007), Gaggero et al. (2002), Rocha et al. (2002) e Rocha (2014) que realizaram análises sob diferentes formas preparos, umidades e tensões normais, o que dificulta a comparação dos resultados devido aos diferentes fatores de variação.

A contribuição da tensão de água sobre o ângulo de atrito está associada ao efeito lubrificante que a água exerce quando recobre as partículas sólidas. Assim, na medida em que a tensão aplicada sobre a água do solo aumenta, os filmes de água existentes sobre as partículas vão se desfazendo, reduzindo seu efeito lubrificante e, portanto, aumentando o atrito entre as mesmas (BRAIDA et al, 2007).

Os resultados obtidos do solo aplicadas nas camadas 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m foram próximos devido às cargas aplicadas, também serem próximas (Figura 2). Pode-se observar que houve variação do comportamento do solo durante o ensaio, registrando-se uma resistência de pico bem definida na tensão de 6 kPa. A resistência de pico indica um comportamento típico de areia compacta, e se observa um aumento da tensão com o deslocamento até a máxima resistência do solo, com posterior decréscimo e estabilização da tensão ao longo ensaio. Em Reis (2006), o comportamento de pico pode estar associado ao comportamento proporcional à rugosidade, granulometria e densidade do solo. Barbosa

&Lima (2015) identificaram como frágil solos que apresentam uma queda brusca após a tensão de pico elevado; comportamento observado no ensaio de 6 kPa (Figura 2B).

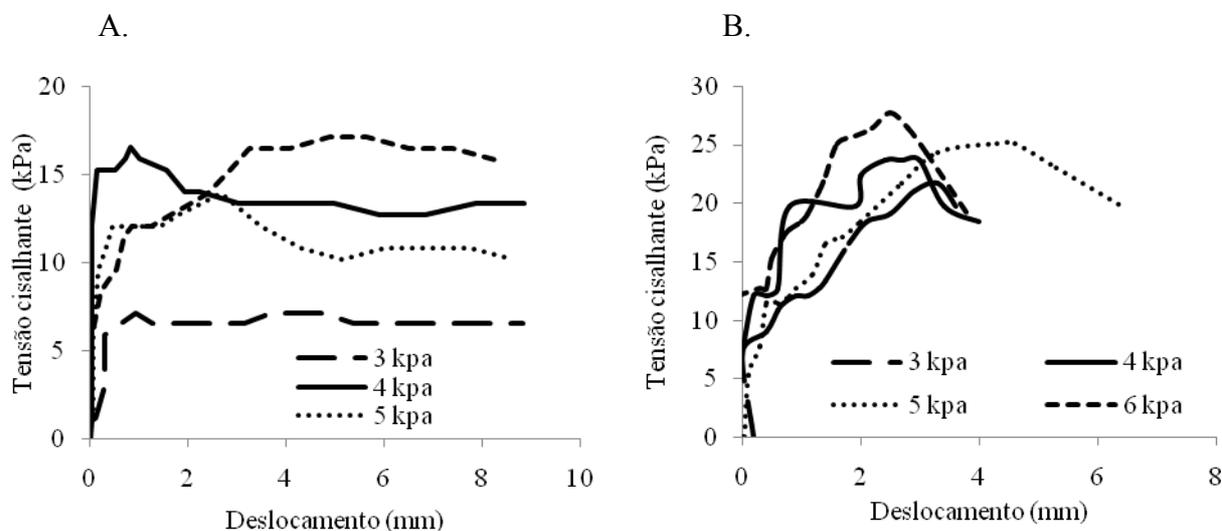


Figura 2. Tensão em função do deslocamento de um Argissolo Amarelo distrocoeso na profundidade para 0,00-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (b)

Para a profundidade 0,00-0,20 m, as três primeiras componentes principais explicaram 74% da variância dos dados (a soma dos três primeiros autovalores). O primeiro componente explicou 27% da variabilidade dos atributos do solo, constituído por coesão, argila, GF, LP, e CO com escores positivos, e areia fina com escore negativo.

A proporção acumulada entre o primeiro e o segundo fator explicou 50% da variabilidade e a Pt foi o carácter individual de maior carga fatorial seleccionado dentro do segundo fator (Tabela 3). Para o terceiro fator, o atrito foi maior e único seleccionado.

Na profundidade 0,00-0,20 m, o primeiro fator agrupou as variáveis mais relacionadas com a fração argila, e os elementos cimentantes do solo que contribuem para o incremento da coesão do solo. A areia fina apresenta carga negativa no primeiro fator, contrário as demais variáveis correlacionadas a este fator (Tabela 3).

Os dois componentes principais juntos possibilitaram uma ordenação bidimensional dos acessos e das variáveis, na profundidade 0,00-0,20 m, o que permitiu a construção de um diagrama de ordenação unitária com os fatores que evidenciam o escore da coesão (Figura 3A) e o escore do atrito (Figura 3B). A quantidade da informação total das variáveis originais, retida pelos dois componentes principais em cada diagrama de ordenação unitária, foi de 50%.

Tabela 3. Cargas fatoriais após a rotação Varimax para a profundidade 0,00-0,20 m

	D1	D2	D3
Coesão	0,587*	-0,614	-0,389
Ângulo de atrito (ϕ)	-0,084	0,038	0,957*
DP	-0,261	0,345	0,426
Ds	-0,076	-0,968*	0,103
Pt	0,063	0,979*	-0,082
Argila	0,862*	0,248	-0,259
Areia fina	-0,428*	0,193	0,518
Silte	0,082	-0,123	0,434
GF	0,956*	0,232	-0,116
Lp	0,856*	-0,362	0,136
Agregados 1-0,5 mm	0,101	0,352*	-0,667
CO	0,471*	-0,226	-0,727

* correspondem ao fator para o qual o coseno quadrado é o maior (maior peso)

Coesão, silte, CO e LP estão no mesmo quadrante (Figura 3A), em que coesão e LP estão mais próximos do círculo unitário, indicando maior contribuição com a variação total. A Figura 3B, composta pelos 1º e 3º fatores, apresenta ϕ , areia fina e DP no mesmo quadrante, no qual o ϕ apresenta grande contribuição para a variação deste fator devido a proximidade ao círculo unitário. No quadrante oposto encontra-se coesão, CO e argila, no qual se tem agrupamento de variáveis para coesão e ϕ bem definidos. Para o presente estudo, pode-se inferir que o elevado valor de ϕ , seja devido à classificação do solo franco arenoso e as baixas tensões normais aplicadas.

O ϕ para ambos os diagramas, encontra-se no quadrante oposto ao do CO, o que também foi verificado em Mazurana (2011), que observou correlação negativa entre as variáveis.

Para a profundidade 0,20-0,40 m, as três primeiras componentes principais explicaram 84% da variância dos dados (a soma dos três primeiros autovalores). O primeiro componente explicou 26% da variabilidade dos atributos do solo. Esse componente é constituído por coesão, argila, GF, LP, e CO com escores positivos, e areia fina com escore negativo.

A proporção acumulada entre o primeiro e o segundo fator explicou 74% da variabilidade e o CO foi o caráter individual de maior carga fatorial selecionado dentro do segundo fator (Tabela 4). Para o terceiro fator, agregado de 1-0,5 mm foi maior e único selecionado.

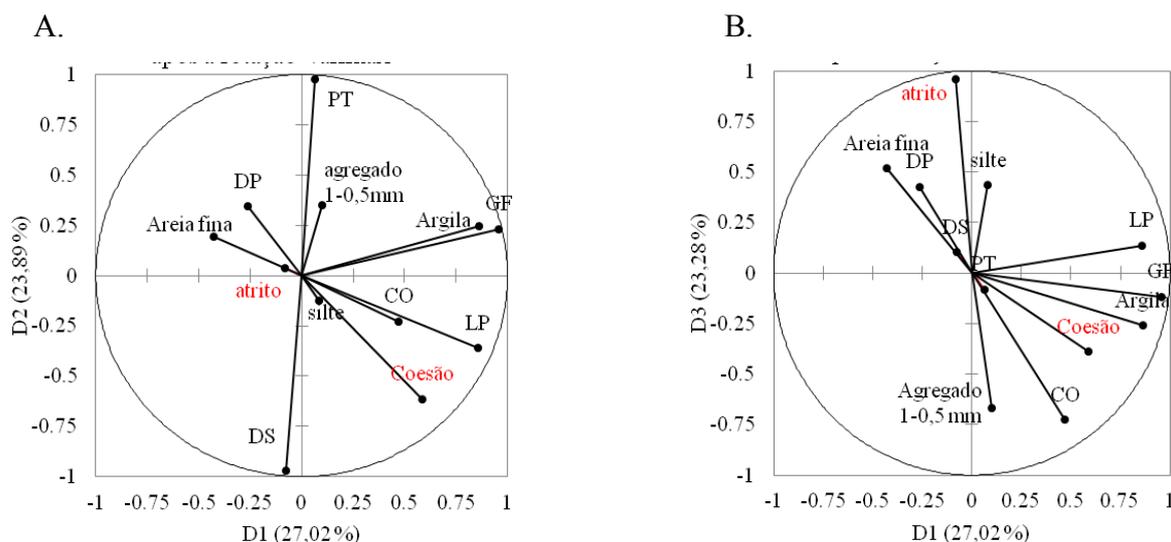


Figura 3. Diagrama de ordenação unitária da primeira (D1) e segunda (D2) componente principal após a rotação Varimax (A), e da primeira (D1) e terceira (D3) componente principal após rotação Varimax (B) para a profundidade 0,00-0,20 m; atrito - ϕ

Tabela 4. Cargas fatoriais após a rotação Varimax para a profundidade 0,20-0,40 m

	D1	D2	D3
Coesão	-0,531*	0,478	0,680
ϕ	-0,082	-0,802*	0,133
Ds	-0,850*	0,083	0,304
Pt	0,837*	0,047	-0,326
Silte	0,366*	-0,443	-0,758
GF	-0,104*	0,904	0,343
GC	-0,871	-0,217*	0,246
LP	0,427*	-0,714	-0,002
LL	0,617*	-0,608	0,114
Agregados >2mm	0,509*	0,041	-0,721
Agregados 1-0,5 mm	-0,083	-0,325	0,913*
pH _{CaCl}	0,433	0,839*	-0,036
pH _{água}	-0,244*	0,823	0,353
CO	0,220	0,872*	-0,204

* correspondem ao fator para o qual o coseno quadrado é o maior

Na Figura 4 é apresentado o diagrama de ordenação unitária dos acessos e das variáveis da profundidade 0,20-0,40 m. Pode-se verificar pelo gráfico que a maioria das variáveis apresentou grande contribuição na explicação da variabilidade dos dados, indicada pela proximidade de cada variável a extremidade do círculo.

A coesão está no mesmo quadrante que Ds, pH_{água} e Ds, resultados que corroboram Silva & Carvalho (2007) que verificaram correlação positiva entre coesão e Ds, provavelmente devido a proximidade entre as partículas do solo e o preenchimento de poros pela iluviação da argila que contribuem para o adensamento do solo. A relação entre

coesão e Ds intermediada pela argila foi detectada apenas na camada 0,20-0,40 m, provavelmente, devido ao baixo percentual de argila no Argissolo estudado.

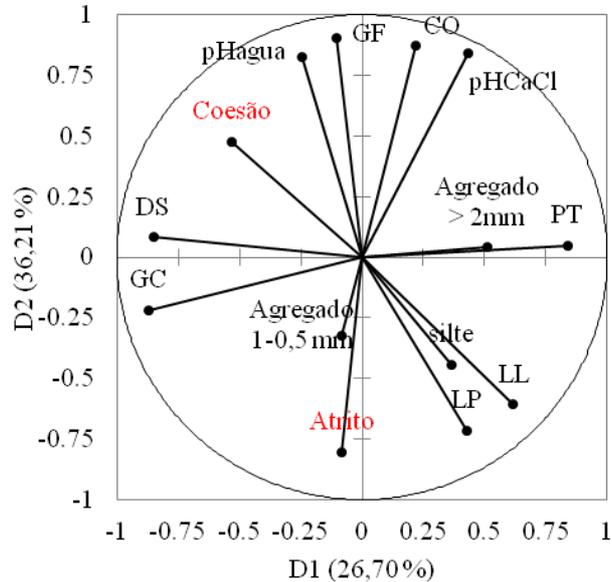


Figura 4. Diagrama de ordenação unitária da primeira (D1) e segunda (D2) componente principal após a rotação Varimax, para a profundidade 0,20-0,40 m; atrito - ϕ

Conclusões

1. O Argissolo Amarelo distrocoeso estudado apresenta coesão de 16,57 e 14,87° para a profundidade 0,00-0,20m e 0,20-0,40 m, respectivamente.
2. O Argissolo Amarelo distrocoeso estudado apresenta ângulo de atrito de 38,84 e 39,65 kPa, para a profundidade 0,00-02 m e 0,20-0,40 m.
3. O ângulo de atrito é o componente que contribui para a resistência ao cisalhamento do Argissolo Amarelo estudado.
2. A análise de componentes principais identificou os atributos do solo que mais se relacionam com coesão e ângulo de atrito;
3. Melhores correlações foram observadas na profundidade 0,00-0,20 m.

Referências Bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.
- Barbosa, M. C. R.; Lima, H. M. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.113-120, 2012.
- Baver, L. D.; Gardner, W. H.; Gardner, W. R. *Soil physics*. New York: 4th ed. John Wiley & Sons, 1972, 498p.
- Biris, S. S.; Vladut, V. Use of finite element method to determine the influence of land vehicles traffic on artificial soil compaction, water stress, In: Rahman, I. M. M. *Water stress*. Croatia: Intech, 2012. cap. 9, p.179-199.
- Braida, A. J.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Soares, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. *Ciência Rural*, v.37, p.1646-1653, 2007.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. *Manual de métodos de análises de solo*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2.ed., 1997. 212p.
- Gaggero, M. R.; Trein, C. R.; Ippoliti, G. Influência de sistemas de preparo e pastejo nas características físicas do solo. *Revista do Programa de Ciências Agro-Ambientais*, v.1, p.1-16, 2002.
- Keller, T.; Lamande, M.; Peth, S.; Berli, M.; Delenne, J. Y.; Baumgarten, W.; Rabbel, W.; Radja, F.; Rajchenbach, J.; Selvadurai, A. P. S.; Or, D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil & Tillage Research*, v.128, p.61-80, 2013.
- Machado, A. L. T. *Previsão do esforço de tração para ferramentas de hastes com ponteiras estreitas em dois solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS, 2001, 172p. Tese Doutorado.
- Maule, R. F.; Mazza, J. A.; Martha J. R. G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agricola*, v.58, p.295-301, 2001.
- Mazurana, M. *Atributos físicos, mineralógicos e matéria orgânica de solos relacionados à capacidade de suporte de carga*. Porto Alegre: UFRGS, 2011, 169p. Dissertação Mestrado.
- Mccormack, D. E.; Wilding, L. P. Soil properties influencing strength of cranfield and geeburg soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.43, p.167-73, 1979.

- Oliveira, V. S. Compactação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. Recife: UFRPE, 2008. 81p. Tese Doutorado.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. M. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.417-428, 2011.
- Reis, J. H. C. Modelo de atrito estático em interfaces de contato entre concreto e areia. São Carlos: USP, 2006, 188p. Tese Doutorado.
- Rocha, I. P. Erosão em talude da margem do baixo São Francisco e contribuição de raízes na resistência ao cisalhamento do solo. Recife: UFRPE, 2014, 78p. Tese Doutorado.
- Rocha, W. W.; Dias Júnior, 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, p.297-303, 2002.
- Rodrigues Jr., F. A.; Magalhães, P. S. G.; Franco, H. C. J. Soil attributes and leaf nitrogen estimating sugar cane quality parameters: Brix, pol and fibre. *Precision Agriculture*, v.14, p.270-289, 2013.
- Rosa, D. P. Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação. Santa Maria: UFSM, 2007, 122p. Dissertação mestrado.
- Silva, A. J. N. Carvalho, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.853-862, 2007.
- Simões Neto, D. E.; Oliveira, A. C.; Rocha, A. T.; Freire, F. J.; Freire, M. B. G. S.; Nascimento, C. W. A. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.347-354, 2012.
- Sobral, L. F.; Silveira, K. R.; Viana, R. D. Correlações entre os Métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e resina para análise de P e K em solos dos Tabuleiros Costeiros. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 35, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2008.
- Stokes, A.; Mattheck, C. Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany*, v.47, p.693-699, 1996.

CAPÍTULO IV

Estabilidade de agregados e resistência à penetração após mobilização de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Estabilidade de agregados e resistência à penetração após mobilização de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Resumo: A avaliação dos perfis mobilizados do solo pode fornecer informações importantes sobre sua eficiência na descompactação do solo. Assim, o presente estudo tem como objetivo verificar a eficiência do preparo na redução da resistência à penetração e o impacto sobre a estabilidade de agregados de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. O experimento foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), localizada no Município de Carpina, PE. Medidas da resistência à penetração, área e profundidade mobilizada, e percentual de agregados do solo foram realizadas antes e após o preparo do solo. A mobilização reduziu em 54% a resistência à penetração e os agregados do solo foram afetados com redução do percentual da classe >2; 0,5-0,25 e <0,25 mm. O carbono orgânico e a umidade do solo durante o preparo contribuíram positivamente para maior mobilização do solo. Argila e areia fina contribuíram negativamente.

Palavras-chaves: Perfil mobilizado, sulcagem, gradagem, resistência do solo

Resistance to penetration and mobilized area during the preparation of a Ultisol distrocoeso

Abstract: The evaluation of the mobilized soil profiles can provide important information about its efficiency in soil unpacking. This study aims to determine the effectiveness of the preparation in reducing the penetration resistance and the impact on aggregate stability of a cohesive Ultisol cultivated with sugarcane. The experiment was conducted at the Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC / UFRPE), located in the city of Carpina, PE. Penetration resistance measurements, area and mobilized depth, and percentage of soil aggregates were performed before and after soil preparation. It was found that the reduced by 54% the resistance to penetration and the soil aggregates were affected by reducing the percentage of the class > 2; 0.5-0.25 and <0.25 mm. The organic carbon, plastic limit and soil moisture during the preparation contributed positively to increased tillage. Clay and fine sand contributed negatively.

Keywords: Profilometer, shank, disk plow, soil physical quality, sugarcane

Introdução

O preparo do solo e colheita mecanizada tem sido intensificado para atender a demanda por alimentos (VISCHI FILHO et al., 2015) e durante processos inadequados de preparo e colheita e tráfego de veículos pode ocorrer a compactação do solo, o que repercute no desenvolvimento da cultura (BRAGA et al., 2015; LIPIEC et al., 2012; MARTINS et al., 2013). Quando o solo é compactado, a porosidade de aeração decresce e a resistência do solo à penetração das raízes é incrementada (RAMOS et al., 2013). Por outro lado, quando o solo é mobilizado em condições ideais poderá reduzir o número de operações de preparo e, conseqüentemente, a energia total aplicada no solo será menor, o que diminui o risco de compactação do solo (ARVIDSSON & KELLER, 2004).

Em condições de campo, o solo é um material heterogêneo onde seus atributos podem variar no tempo e espaço (BÉCEL et al., 2012). Existe uma relação mútua entre a mobilização e os atributos do solo. Por um lado, atributos como umidade, textura, densidade do solo e resistência à penetração podem interferir na mobilização do solo proporcionando maior ou menor esforço tratorio (KLEIN & LIBARDI, 2001; ROSA, 2007). Por outro, cultivo com excessivo número de passadas também pode interferir nos atributos do solo por destruir torrões e agregados do solo e reduzir a porosidade (COLLARES et al., 2008). Além disso, o tráfego de veículos pode aplicar uma carga além da capacidade de suporte do solo, que causará compactação.

Segundo Cepik (2002), os sulcadores possuem geometria que favorece a uma boa mobilização do solo na linha de semeadura, sem muita perturbação da superfície, permitindo a quebra de possíveis camadas compactadas e a diminuída resistência do solo às raízes, mantendo a agregação do solo, que é importante por proteger o solo contra erosão, manter o movimento de água e ar nos poros do solo, melhorar a fertilidade e contribuir no sequestro de carbono (ESMAEILZADEH & AHANGAR, 2014). Segundo Carvalho Filho et al. (2007), a avaliação dos perfis mobilizados do solo pode fornecer informações importantes sobre sua eficiência na descompactação do solo.

Chen & Weil (2010) discutem que no plantio direto as raízes das plantas também contribuem na redução da compactação por oferecerem caminhos de mais baixa resistência para o crescimento de culturas subsequentes, por criarem espaços preferenciais classificados como bioporos, que variam de cultura para cultura. No caso da cana-de-

açúcar, as variedades podem contribuir com maior ou menor quantidade de raízes. Ivo (2012) verificou a variedade RB86 7515 apresentou maior quantidade de raízes em três anos em comparação com a variedade de RB92 579 em 8 anos. O crescimento dessa variedade é rápido, com maturação tardia e de alta produtividade agrícola; devedo ser plantada em solos de média/baixa fertilidade e colhida em meados da safra ou bem no final, para explorar o rápido crescimento; tolerante à seca e tem-se adaptado muito bem aos solos arenosos (MARQUES & SILVA, 2008). A variedade é muito produtiva, exigente em água, com colheita no meio da safra, ao menos 50% da quantidade de raízes tende a distribuírem-se nos primeiros 20 cm da camada de solo, para ambas as variedades. A quantidade de raízes tende a ser maior em cana crua na variedade RB86 7515.

Com base no exposto, o objetivo do presente estudo foi o de quantificar a eficiência do preparo de um Argissolo Amarelo para o cultivo com cana-de-açúcar na redução da resistência à penetração e o impacto sobre a estabilidade de agregados.

Material e Métodos

Área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), situada no Município de Carpina, PE e se situa nas coordenadas 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco. A precipitação durante a condução do experimento foi obtida por meio de estação meteorológica da EECAC (Figura 1).

A área experimental está localizada em um Argissolo Amarelo distrocoeso de aproximadamente 0,88 ha e formato dividido em 16 parcelas experimentais, com 26,00 m de largura e 16,00 m de comprimento, espaçadas em 2,00 m cada uma. O solo é classificado como franco arenoso (Tabela 1).

A umidade gravimétrica correspondente a capacidade de campo foi obtida pela equação $wv = (w/Ds) \times 100$ em que w é a umidade gravimétrica, wv é a umidade volumétrica na capacidade de campo, obtida pela curva de retenção (Figura 2) e Ds é a densidade do solo. Para o Argissolo Amarelo estudado a umidade na capacidade de campo para a profundidade 0,00-0,20 m foi de 6% e para a profundidade de 0,20-0,40 m 7%.

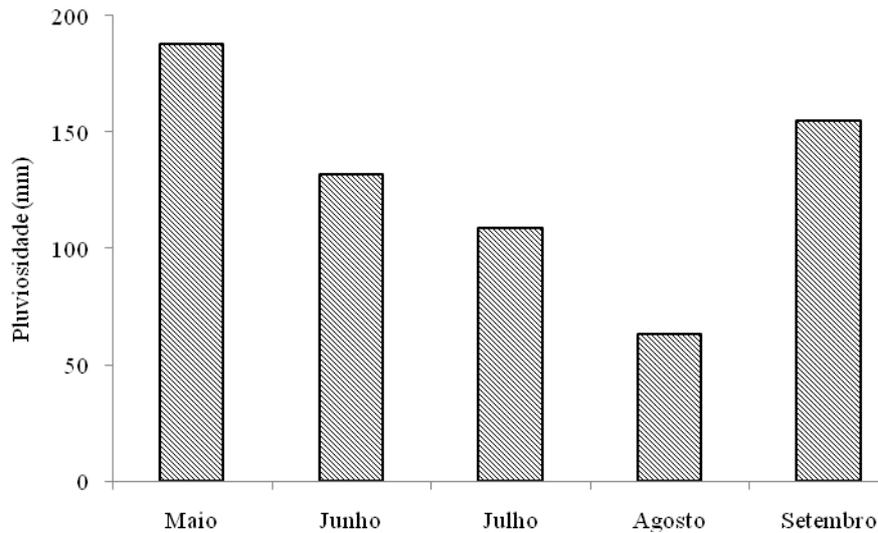


Figura 1. Pluviosidade de 2014 durante os meses de experimento

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar

	Argila	Areia fina	Areia grossa	Silte	Ds	w _{prep}
	g. kg ⁻¹	g. kg ⁻¹	g. kg ⁻¹	g. kg ⁻¹	g.cm ⁻³	%
0,00-0,20 m	130,41	214,47	511,06	140,85	1,41	13,74
0,20 -0, 40 m	137,79	212,86	517,71	130,38	1,59	

Ds – Densidade do solo; w_{prep} – umidade durante o preparo do solo

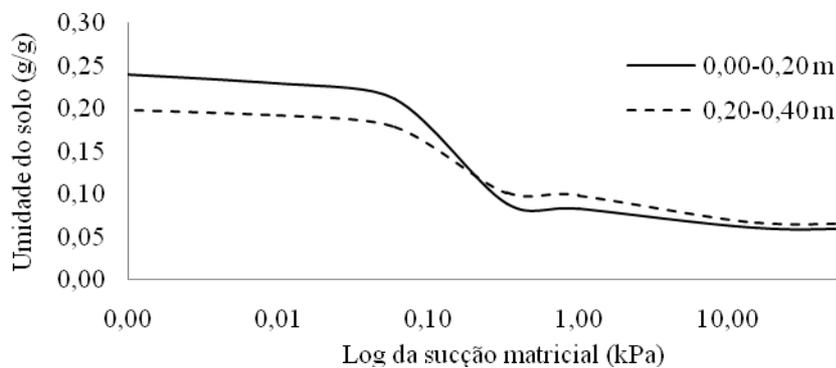


Figura 2. Curva de retenção de água para um Argissolo Amarelo distrocoeso

Coleta de amostras em dois períodos

Foram estabelecidos dois momentos para coleta de solo: em maio de 2014 e em setembro de 2014. A primeira coleta é classificada como antes da renovação da área (T1) e corresponde ao estado de compactação do solo após 5 anos sob cultivo de cana-de-açúcar e sucessivos tráfegos de veículos na área durante este período. A segunda coleta de solo é classificada como após a renovação da área (T2) e representa o estado e de compactação do solo após a renovação com o início de um novo ciclo de cultivo de cana-de-açúcar.

Implementos para o preparo do solo e plantio das variedades

Foram aplicados em faixas alternadas dois preparos do solo: gradagem e sulcagem do solo (P1) e sulcagem do solo (P2). A gradagem foi realizada com trator Massey Ferguson 4292 com arado de disco acoplado fabricante Baldan, modelo bia, com 16 discos de 30 cm de diâmetro e a sulcagem com o trator John Deere 6405 com o implemento sulcador de cana de três linhas fabricante baldan modelo bia, com espaçamentos de 1,10 m e profundidade de trabalho de 30-40 cm. Definiu-se a abertura de 23 sulcos por parcela, com espaçamentos de 1,10 m.

Foram utilizadas as variedades RB86 7515 e RB92 579. O plantio da cana-de-açúcar foi realizado forma manual com cerca de 18 gemas por metro linear. As mudas foram seccionadas dentro do sulco com auxílio de facão.

Delineamento estatístico

Os dados de T1 e T2 foram submetidos a análise de covariância. As análises de variância e covariância foram efetuadas, utilizando o usando o pacote estatístico SAS, versão 9.2 (SAS INSTITUTE, 2008). Para a verificação das pressuposições do modelo, realizou-se o teste de esfericidade da matriz de variâncias e covariâncias entre tempos. A hipótese de esfericidade das matrizes de variância e covariância não foi rejeitada para as variáveis estudadas.

Isoladamente, realizou-se para os dados de T2 a análise de variância em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com dois modos de preparos do solo (P1 – gradagem e sulcagem; P2 – sulcagem) e duas variedades de cana-de-açúcar (V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579), totalizando 4 tratamentos (P1V1, P1V2, P2V1, P2V2), com 4 repetições. Nas parcelas foram aplicados os preparos do solo e nas subparcelas duas variedades de cana-de-açúcar. Quando necessário efetuou-se comparação de médias entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Análises dos atributos d o solo

A textura do solo foi determinada pelo densímetro de Boyoucos, com dispersão de 50 g de terra fina seca ao ar com 25 ml de hexametáfosfato de sódio tamponado com carbonato de sódio. A areia foi separada por tamisação, enquanto a argila por sedimentação e o silte por diferença, conforme da EMBRAPA (1997).

O ensaio de resistência à penetração (RP) foi realizado nos tempos T1 e T2, no ponto central de cada parcela, com o auxílio de penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar Stolf reduzido com ângulo de cone de 30°. A profundidade investigada foi até 40 cm, com anotação do número de golpes anotado a cada 5 cm.

A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm por impacto) em resistência à penetração, em MPa, foi obtida segundo Stolf, pela aplicação da equação 1:

$$RP = \frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M+m}\right)^2}{A} \quad (1)$$

em que:

RP = resistência do solo à penetração, kgf cm⁻² (kgf cm⁻² × 0,098 = MPa); M = massa do êmbolo, 1,6 kg (Mg – 1,6 kgf); m = massa do aparelho sem êmbolo, 1,47 kg (Mg – 1,47 kgf); h = altura de queda do êmbolo, 26 cm; x = penetração da haste do aparelho, cm por impacto, e A = área do cone, 1,35 cm².

As coletas para análise de densidade (Ds) foram realizadas por meio de amostrador de Uhland e o anel volumétrico de 0,05 m de altura e 0,02 m de diâmetro; a umidade do solo, medida no mesmo momento que se avaliou a RP. Uma segunda medição da umidade foi realizada durante o preparo do solo.

Foi realizada a aferição do relevo original e o perfil de solo mobilizada por meio do uso de perfilômetro, conforme Carvalho Filho et al. (2008). Para mensuração dos parâmetros, o perfilômetro foi usado em cada parcela, antes da passagem da ferramenta de corte no solo, para obter o perfil natural, e após a passagem para medir a área transversal (mobilizada), sendo tomadas leituras no mesmo local e posicionamento. Estroncas dispostas nas bordas do terreno nos blocos, auxiliaram na correta locação do perfilômetro antes (T1) e após (T2) a mobilização dos tratores e também como referência de nível para que as medidas fossem tomadas na mesma altura antes e após a passagem da grade e sulcador.

O perfilômetro foi construído com 1,50m de largura e 1,50 m de altura, equipado com varetas de 1,00 m e espaçadas 0,02m. Nível de bolha foi acoplado no topo do perfilômetro para assegurar seu nivelamento. Antes e após a passagem do implemento, em cada uma das parcelas o perfilômetro foi posicionado na linha da cana-de-açúcar e por meio de fotos digitais, foram registradas a distribuição das hastes ao longo do perfil do

solo. A distância vertical medida entre o fundo do sulco e a superfície do solo correspondeu à profundidade máxima do mesmo.

Os cálculos da área da camada mobilizada foram obtidos por meio da Regra de Simpson:

$$\int_{X_0}^{X_n} dx = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + \dots + 2f_{n-1} + f_n)$$

em que:

$$h = (X_n - X_0)/n, X_n > X_0$$

n = número de intervalos

f = altura das cotas (mm)

h = distância entre cotas (cm)

x = número de cotas

A área de solo mobilizada será determinada a partir da equação:

$$A_m = \sum (PN - PF) * e$$

em que,

A_m - área mobilizada (m^2);

PN- perfil da superfície natural do solo para cada ponto do perfilômetro (m);

PF - perfil da superfície final do solo para cada ponto do perfilômetro (m), e

e - espaçamento entre as réguas verticais (m).

A estabilidade de agregados foi obtida utilizando-se um agitador de oscilação vertical (Yoder) de marca Solotest. Para a determinação da agregação do solo, a amostra foi seca ao ar, destorroado e separado o material com diâmetro entre 4 e 2 mm, por meio de peneiras conduzidas em duplicata. As amostras foram umedecidas e após 30 minutos, colocados em dois conjuntos de cinco peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm, respectivamente; em seguida, os conjuntos de peneira foram submetidos à agitação vertical, em recipiente com água. O material retido em cada peneira foi posteriormente colocado em recipientes para secagem em estufa a 105°C, durante 24 horas e por fim pesado em balança digital. Os valores do diâmetro médio ponderado (DMP), do módulo de finura (MF) e somatório dos porcentuais, a 2,00 mm (AGRI) foram avaliados segundo Freire & Piedade Jr. (1979), Kemper & Rosenau (1986) e Wendling et al. (2005), respectivamente determinados segundo as fórmulas a seguir:

$$\text{DMP} = S (cp \times p)$$

$$\text{MF} = S [(4-2)+(2-1)+(1-0,5)+(0,5-0,25)+(0,25-0,125)(<0,25)]/100$$

$$\text{AGRI} = w_{i>2} \times 100$$

Onde:

Cp= Centro de cada classe de peneira;

P= O peso seco da amostra (%);

MF= Módulo de finura dos agregados;

Σ = Somatório da porcentagem acumulada de agregados em cada classe;

$w_{i>2}$ = Representa a proporção de agregados >2,00 mm.

Foi realizada a análise de variância para a profundidade do perfil e para a área mobilizada em função dos preparos de grade e sulcador (P1) e sulcador (P2).

Os teores carbono orgânico (CO), limite de plasticidade (LP), umidade durante o preparo (w_{prep}), e areia grossa foram quantificados e comparados com a mobilização do solo.

Resultados e Discussão

Antes da renovação da área, em T1, a RP apresentou valor de 2 MPa, considerada alta resistência, segundo a Soil Survey Staff (1993), nas duas profundidades. O DMP observado está acima do observado em Vicente et al. (2012) nas duas profundidades e Hickmann et al. (2011), na superfície. Como o DMP é um índice de estabilidade dos agregados diretamente relacionado com os macroagregados, e por consequência com a resistência do solo a erosão, pode-se concluir que o Argissolo estudado se encontra em melhor condição em relação aos Argissolos amarelos cultivados com cana-de-açúcar estudados por Vicente et al (2012) (Tabela 3).

O MF encontrado, corrobora aos resultados encontrados em Vicente et al. (2012) para a profundidade 0,00-0,20m. Na profundidade 0,20-0,40 m, os valores de MF estavam abaixo dos observados (Tabela 2).

Tabela 2. Média da densidade do solo (Ds), em g.m⁻³, umidade (w) em %, carbono orgânico (CO) em dag.kg⁻¹, resistência à penetração (RP), em MPa, diâmetro médio ponderado (DMP) em mm, módulo de finura (MF), em (%) para o período T1

	Ds	w	CO	RP	DMP	MF
0,00-0,20 m	1,43	11,99	1,68	2,73	2,77	3,27
0,20-0,40 m	1,61	13,33	1,48	2,89	1,61	2,69

A renovação da área com a aplicação dos tratamentos de preparo do solo e variedades de cana-de-açúcar alterou os atributos do Argissolo Amarelo estudado entre os períodos (Tabela 3). Pela análise de covariância, verificou-se diferença significativa da RP, DMP e MF de T1 e T2, na superfície. Consoante com Medvedev (2009), A RP mostrou-se um atributo do solo mais sensível ao caracterizar o preparo do solo do que a Ds.

A interação entre os dois tratamentos não promoveu diferença estatística para os atributos físicos ou químicos do solo (Tabela 3), mas promoveu diferença estatística para a porcentagem de agregados e RP, discutidos detalhadamente mais adiante.

Tabela 3. Média da densidade do solo (Ds), em g.cm⁻³, umidade (w) em %, carbono orgânico (CO) em dag.kg⁻¹, resistência à penetração (RP), em MPa, diâmetro médio ponderado (DMP) em mm, módulo de finura (MF), em (%) para o período T2

	Ds	w	CO	RP*	DMP*	MF*
0,00-0,20m						
P1V1	1,34a	9,97a	1,57a	1,50a	2,59a	3,22a
P1V2	1,39a	9,43a	1,55a	1,47a	2,46a	3,19a
P2V1	1,37a	11,23a	1,64a	2,25a	2,68a	3,24a
P2V2	1,34a	12,35a	1,65a	2,40a	2,92a	3,37a
0,20-0,40m						
P1V1	1,58a	12,83a	1,35a	2,48a	1,87a	2,85a
P1V2	1,53a	12,40a	1,29a	2,22a	1,31a	2,54a
P2V1	1,60a	12,48a	1,26a	2,46a	1,62a	2,71a
P2V2	1,56a	12,35a	1,35a	2,63a	2,52a	3,20a

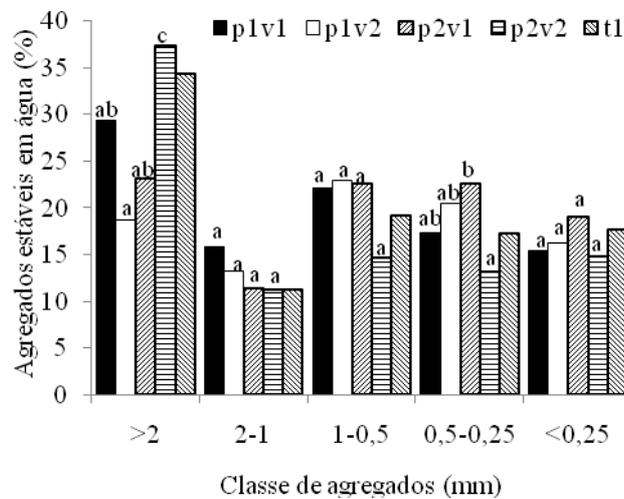
Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%* - Significativo pela análise de covariância de T1 para T2; T1 – Antes do preparo; T2 – Após o preparo; P1 – gradagem + sulcagem; P2 – sucagem; V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579

Agregados

Os agregados de maior diâmetro (>2mm) encontraram-se na superfície do solo, com diferenças entre os tratamentos mais evidentes nesta profundidade. A redução desta classe de agregados com a profundidade pode estar relacionada com a redução do teor de matéria orgânica com a profundidade, como observado por Oliveira (2008). Na subsuperfície predominaram os agregados de menor diâmetro (Figura 3A e B). Verificou-se, em T2, diferença estatística significativa para os agregados de >2 mm e de 0,5-0,25mm, nas duas camadas e agregados <0,25mm na profundidade 0,20-0,40 mm (Figura 5).

Ao se comparar T1 e T2, o tratamento P2V2 promoveu incremento no percentual de agregados >2mm nas duas profundidades e os demais tratamentos (P1v1, P2v1, P1V2) estão abaixo dos resultados observados em T1. Na profundidade 0,20-0,40m os agregados <0,25mm são os de maior ocorrência nesta camada. Este resultado pode ser devido ao CO que contribuiu para a agregação do solo na superfície, após o revolvimento, e devido à maior concentração de argila na subsuperfície que pode ter promovido efeito cimentante nos agregados. A classe de agregados 2-1mm pouco variou entre tratamentos, períodos de coleta ou profundidade, não se verificando

A.



B.

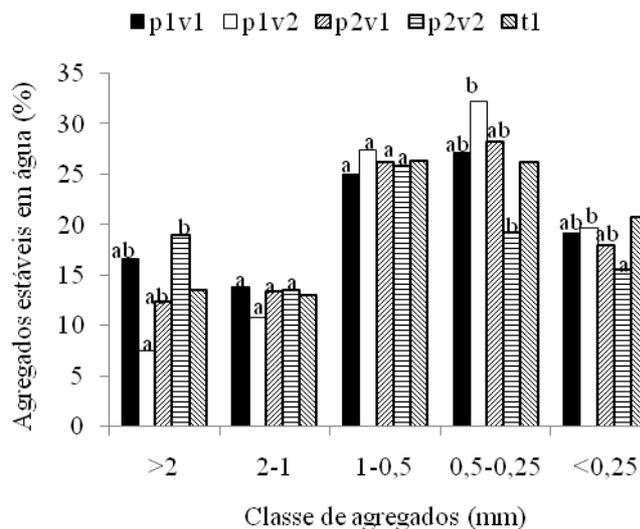


Figura 3. Distribuição dos agregados para o T1 e T2 nas profundidades 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de diferença estatística para os tratamentos aplicados.

Resistência à penetração (RP)

O preparo com grade e sulcador (P1) promoveu redução de 45% da RP para profundidade 0,00-0,20 m e 20% para a profundidade 0,20-0,40 m. O preparo apenas com sulcador (P2) promoveu redução de 17 e 12% para as profundidades 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 4).

O preparo do solo promoveu diferença estatística para a RP. O preparo com grade e sulcador foi mais eficiente na redução da RP, diferindo estatisticamente da condição inicial e do tratamento com sulcador até a profundidade de 20 cm. A profundidade 0,15-0,20 m apresentou maior RP.

Tabela 4. Resistência à penetração(kPa) em função do preparo antes (T1) e após (T2)

	-----T1-----	----- T2-----	
		P1	P2
0,00-0,20 m	2,73a	1,48bA	2,28bB
0,20-0,40 m	2,89a	2,32aA	2,56aA

Letras minúsculas iguais na linha não diferem entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%. Letras maiúsculas iguais não diferem entre as épocas pelo teste de Tukey a 5%. P1 – gradagem + sulcagem ; P2 – sucagem; V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579

Ao se considerar a interação de preparo do solo e variedade de cana-de-açúcar, verifica-se que a eficiência na redução da RP seguiu a ordem P1V2>P1V1>P2V1>P2V2, com respectivamente 54,5; 26,3; 23,5 e 19,1% de redução da RP para cada tratamento em relação à condição inicial, até a profundidade de 25 cm (Figura 4).

Segundo Portz et al. (2009) e Oliveira et al. (2010) a umidade ideal para a medição da resistência à penetração é na capacidade campo do solo, pois nesta condição é obtida boa correlação com o crescimento radicular das plantas. A umidade gravimétrica na capacidade de campo estimada no Argissolo estudado é de 6% para 0,00-0,20 m e 7% para 0,20-0,40 m (Figura 2). As umidades no momento da aferição da RP diferiram da umidade que corresponde à capacidade e de campo do Argissolo estudado (Figura 4) detectando-se elevados valores de RP nas umidades abaixo de 10%. Na Figura 5, são apresentadas todas as medidas de RP realizadas antes e após a renovação da área. Por estas se verifica tanto a distribuição da RP conforme o tratamento como a condição de umidade que se encontrava o solo durante a análise. Outro fator de que influenciou sobre o resultado da RP foi a área mobilizada, a relacionado com a profundidade de trabalho da haste sulcadora, em que se detectou a profundidade máxima de trabalho de 29-32 cm, medido com auxílio e perfilômetro.

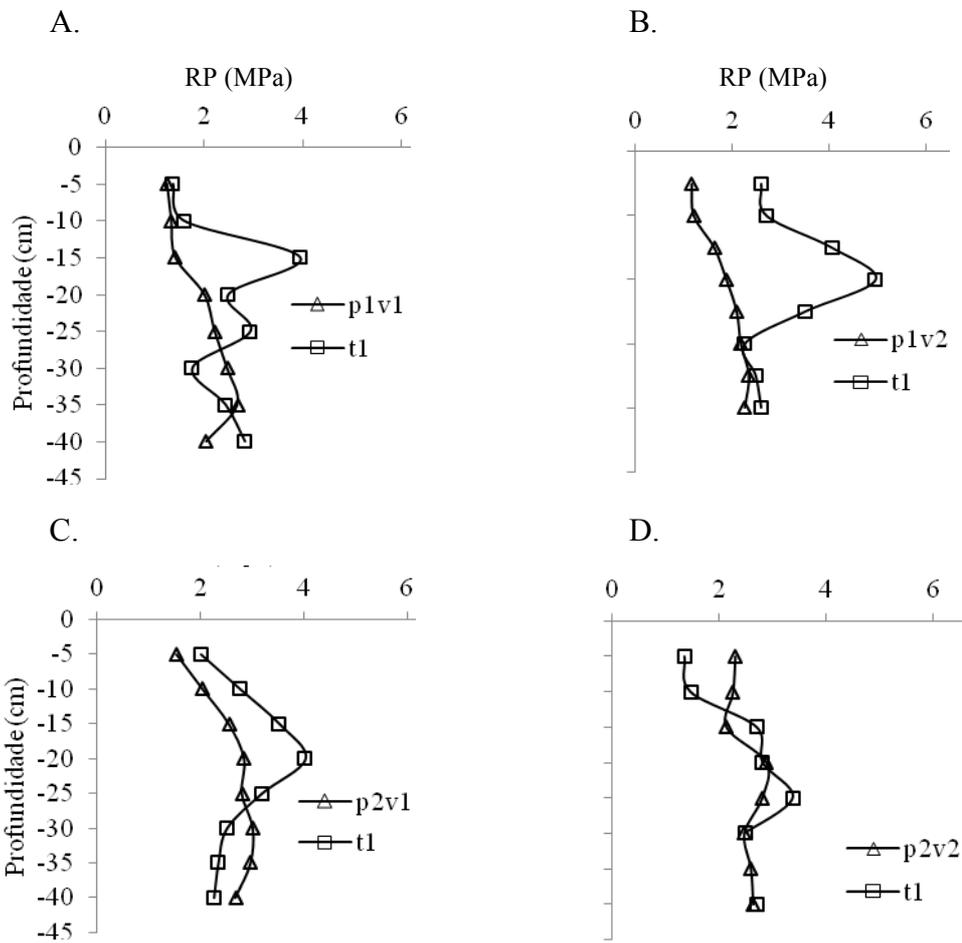


Figura 4. Resistência à penetração agrupadas por tratamento. T1 - antes do preparo; P1 –grade e sulcador e cultivado; P2 –sulcador; V1 – solo cultivado com a variedade RB 867515; V2 – solo cultivado com a variedade V2 RB 92579

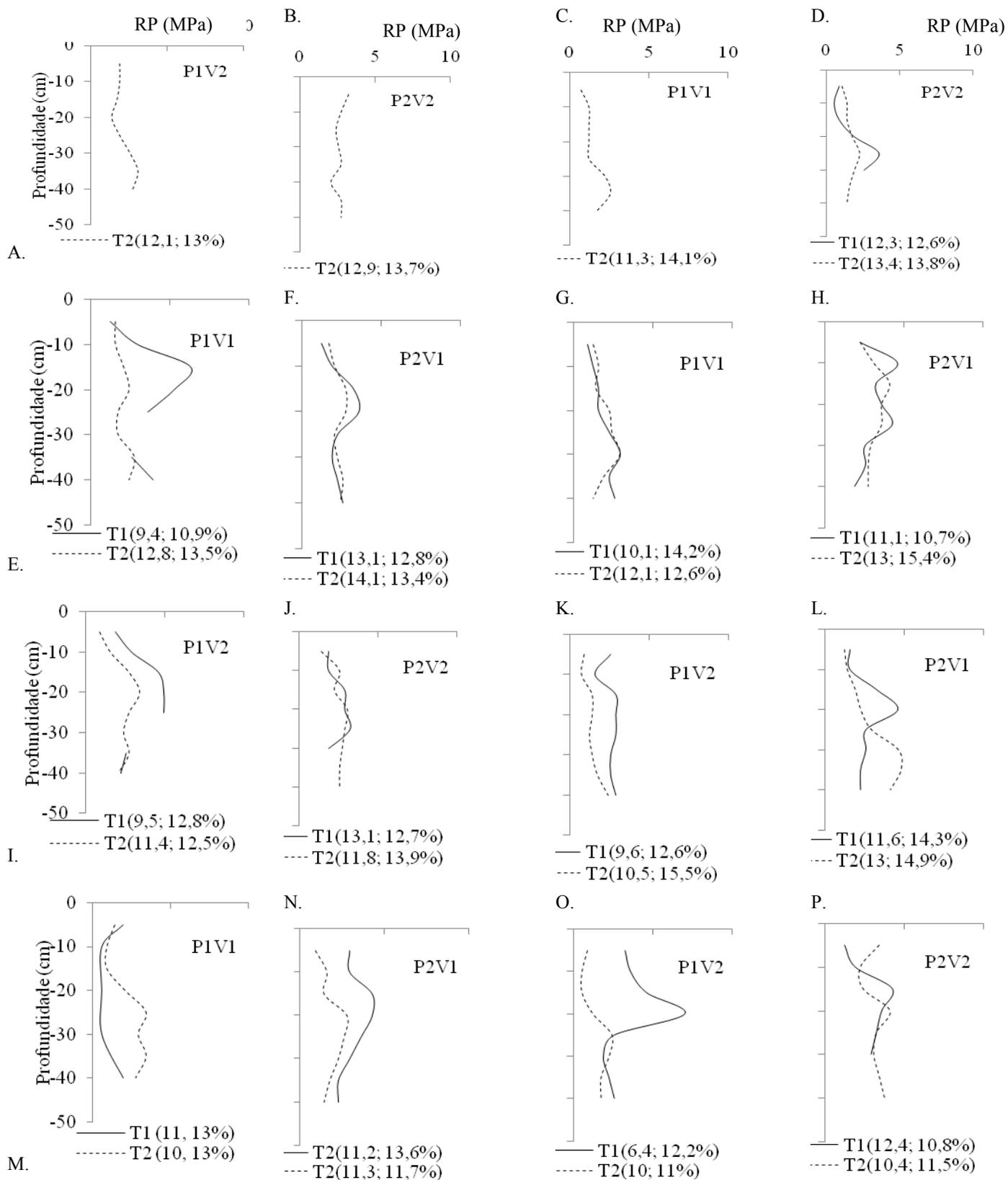


Figura 4. Resistência à penetração entre épocas em cada parcela. Os valores entre parênteses indicam a umidade a 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m respectivamente em que foram aferidas a RP.

Área mobilizada

Não houve diferença estatística para a área mobilizada (AM) e a profundidade do sulco (Tabela 5), provavelmente devido ao trabalho do arado de disco que mobiliza o solo a 1/3 de seu diâmetro, que para a presente pesquisa correspondeu a até 10 cm de profundidade, o que sugere o estudo com outros implementos sobre o Argissolo estudado. Carvalho Filho et al. (2008) observou maior área mobilizada da camada com o uso de arado de aivecas, seguido do escarificador e do arado de discos. Beutler (2005) não encontrou diferenças significativas na profundidade de atuação da haste sulcadora, sob tratamentos de diferentes coberturas de inverno estudadas.

Tabela 5. Profundidade do perfil e área mobilizada segundo o preparo do solo aplicado

Preparo do solo	Profundidade do perfil (m)	Área mobilizada (m ²)
Gradagem + sulcagem	0,31a	0,08 ^a
Sulcagem	0,31a	0,09 ^a

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

A mobilização do solo com grade e sulcador promoveu redução da RP, DMP, MF e alterou o percentual das classes de agregados. Por outro lado, Vizzotto (2006) verificou que sulcadores do tipo haste diminuiu a Ds, incrementou a porosidade total na linha de cultivo e proporcionaram maior superfície e volume de solo mobilizado.

A diferença de perfil natural e mobilizado, Figura 6, proporcionou a medidas da profundidade de preparo e área mobilizada (AM). A passagem do trator e dos implementos segue o sentido vertical, Figura 5, em que a 1^a e 3^a faixa aplicou-se gradagem e sulcagem e na 2^a e 4^a faixa o solo foi apenas sulcado. A profundidade de preparo variou entre os tratamentos e a elevação lateral do solo foi mais destacada para P1 (gradagem+sulcagem).

Pode-se verificar correlação significativa entre a profundidade do perfil e o teor de areia fina, sugerindo decréscimo da mobilização em profundidade o incremento da areia fina (Tabela 6). Melhores correlações, embora não significativas, são observadas para as demais frações texturais do solo e a umidade.

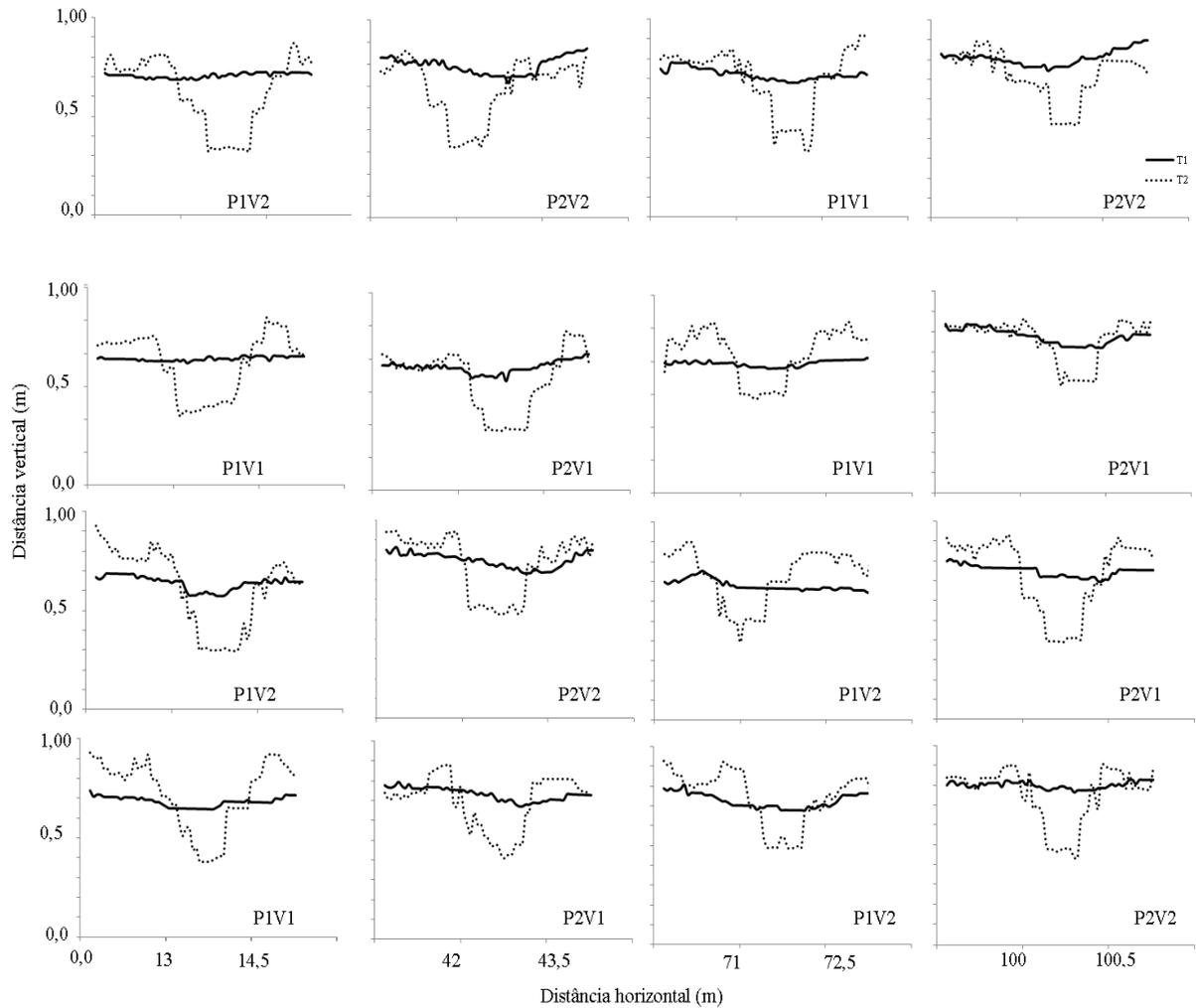


Figura 5. Perfil natural e mobilizado de todas as parcelas estudadas da área de cultivo. P1 – sulcagem + gradagem; P2 – sulcagem; V1 - RB86 7515; V2 –V2 RB92 579

Tabela 6. Correlação de Pearson entre área mobilizada, profundidade do perfil e atributos de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Variáveis	Área mobilizada	Profundidade do perfil
Ds	0,04	0,06
w	0,46	0,45
Argila	-0,09	-0,35
Areia fina	-0,31	-0,6*
Areia grossa	0,12	0,42
Silte	0	-0,03
RP	0,18	0,06
Agregados		
>2 mm	-0,13	0,08
2-1 mm	0,05	-0,18
1-0,5 mm	0,09	-0,15
0,5-0,25 mm	0,25	0,12
<0,25 mm	0,28	-0,06
DMP	-0,18	0,06
MF	-0,23	0,04
CO	0,32	0,33

* - significativo a 5%. Ds - Densidade do solo; w - umidade do solo; RP – Resistência à penetração; DMP – Diâmetro médio ponderado; MF – Módulo de finura; CO – Carbono orgânico

O incremento dos finos do solo e agregados menores sugerem um decréscimo de área mobilizada e profundidade do perfil. A fração grossa do solo, a umidade e o CO contribuíram positivamente para maior área mobilizada e profundidade do perfil. Neste sentido, Beutler (2005) observou que em períodos de déficit hídrico bem como em solos compactados, a mobilização pelos sulcadores não é suficiente para reduzir a compactação do solo. Registrou-se pluviosidade de 22 mm à época de preparo do solo, Figura 1, o que contribuiu para elevar a umidade e diminuir a resistência do solo ao corte dos implementos.

Conclusões

1. RP diferiu estatisticamente na camada 0,00-0,20 m;
2. As classes de agregados >2m, 0,5-0,25mm e <0,25mm foram estatisticamente diferentes em relação ao preparo aplicado.
3. RP mostrou-se mais sensível ao caracterizar o preparo do solo do que a Ds
4. P1 promoveu maior eficiência na redução da RP.

Referências bibliográficas

- Arvidsson, J.; Keller, T. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research*, v.77, p.85-95, 2004.
- Becel, C.; Vercambre, G.; Pages, L. Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching. *Plant & Soil* v.353, p.169–180, 2012.
- Beutler, A. N.; Centurion, J. F.; Freddi, O. S.; Andrioli, I. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.27, p.193-198, 2005.
- Braga, F. V. A.; Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Vogelmann, E. S.; Padrón, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1025-1035, 2015.
- Carvalho Filho, A.; Bonacim, J. L. G.; Cortez, J. W.; Carvalho, L. C. C. Mobilização de um Latossolo Vermelho acriférico em função de preparo do solo. *Bioscience Journal*, v.24,

- p.1-7, 2008.
- Carvalho Filho, A.; Centurion J. F.; Silva R. P.; Furlani C. E. A.; Carvalho L. C. C. Soil & tillage methods: alterations in the roughness of the soil. *Engenharia Agrícola*, v.1, p.229-237, 2007.
- Cepik, C. T. C. Análise do desempenho de uma haste sulcadora de semeadora-adubadora, em diferentes teores de água no solo, velocidades e profundidades de trabalho. Porto Alegre: UFRGS, 2002, 76f. Dissertação Mestrado.
- Chen, G.; Weil, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant & Soil*, v.331, p.31-43, 2010.
- Collares, G. L.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Kaiser, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.933-942, 2008.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2.ed., 1997. 212p.
- Esmailzadeh, J.; Ahangar, A. G. Influence of soil organic matter content on soil physical, chemical and biological properties. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, v.4, p.244-252, 2014.
- Freire, W. J.; Piedade Júnior, C. O módulo de finura dos agregados do solo como índice de estabilidade estrutural. *Engenharia Agrícola*, v.3, p.29-36, 1979.
- Hickmann, C.; Costa, Liovando M.; Schaefer, C. E. G.R.; Fernandes, R. B. A. Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho-amarelo sob diferentes manejos de longa duração e Mata Atlântica secundária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.2191-2198, 2011.
- Ivo, W. M. P. M. Dinâmica da matéria orgânica em áreas de produção de cana-de-açúcar colhida crua e queimada, no Nordeste do Brasil. Recife: UFPE, 2012, 144f. Dissertação Mestrado.
- Kemper, W. D.; Rosenau, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1*. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.425-442.
- Klein, V. A.; Libardi, P. L. Consistência de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista de Ciência do Solo e da Natureza*, v.1, p.54-58, 2001.
- Lima, R. P. Modelos de capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo distrocoeso. Recife, UFRPE, 2013. 58p.

Dissertação Mestrado.

- Lipiec, J.; Horn, R.; Pietrusiewicz, J.; Siczek, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil & Tillage Research*, v.121, p.74-81, 2012.
- Marques, T. A.; Silva, W. H. Crescimento vegetativo e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.8, p.54-60, 2008.
- Martins, P. C. C.; Dias Junior, M. S.; Carvalho, J. S.; Silva, A. R.; Fonseca, S. M. Levels of induced pressure and compaction as caused by forest harvesting operations. *Cerne*, v.19, p.83-91, 2013.
- Medvedev, V. V. Soil Penetration resistance and penetrographs in studies of tillage technologies. *Eurasian Soil Science*, v.42, p.299–309, 2009.
- Oliveira, V. S. Compactação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. Recife: UFRPE, 2008. 81f. Tese Doutorado.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F. B.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.914-920, 2010.
- Portz, G.; Schoenknecht, E.; Albuquerque, M.; Trein, C. Ajuste dos valores obtidos por resistência a penetração (índice de cone), em função da umidade e densidade do solo em condições de campo. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009.
- Ramos, F. T.; Ramos, D. T.; Maia, J. C. S.; Serafim, M. E.; Azevedo, E. C.; Roque, M. W. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-amarelo: com e sem reuso de amostras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.129–136, 2013.
- Rosa, D. P. Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação. Santa Maria: UFSM, 2007. 122f. Dissertação Mestrado.
- Soil Survey Staff. *Soil Survey Manual*. Washington: USDA-SCS. U.S. Gov. Print. Office, 1993. 437p.
- Vicente, T. F. S.; Pedrosa, E. M. R.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Oliveira, A. K. S.; Souza, A. M. P. L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.1215-1222, 2012.
- Vischi Filho, O. J.; Souza, Z. M.; Silva, R. B.; Lima, C. C.; Pereira, D. M. G.; Lima, M. E. L.; Sousa, A. C. M.; Souza, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo

Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.50, p.322-332, 2015.

Vizzotto, V. R. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora sobre os atributos físicos do solo em várzea no comportamento da cultura da soja (*Glycine max* L.). Santa Maria: UFSM, 2014. 78f. Tese Doutorado.

CAPÍTULO V

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM DIFERENTES PREPAROS DO SOLO**

Atributos físicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes preparos do solo

Resumo: Os objetivos da presente pesquisa foi verificar a influência do preparo do solo sobre os parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar e identificar a relação dos atributos físicos, químico e mecânicos do solo. O estudo foi conduzido em condição de campo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), situada no Município de Carpina, PE. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com dois preparos do solo (P1 – gradagem e sulcagem; P2 – sulcagem) e duas variedades de cana-de-açúcar (V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579), com 4 tratamentos (P1V1, P1V2, P2V1, P2V2), em 4 repetições, totalizando 16 parcelas. Analisaram-se variáveis tecnológicas, a saber: brix, pol, pureza, ATR, AR, PC, a fibra e atributos físicos, químicos e; mecânicos do solo: densidade, umidade, carbono orgânico, tensão de preconsolidação, condutividade elétrica, textura, limites de consistência. A análise de variância indicou diferença estatística apenas para o brix. Verificou-se correlação de algumas variáveis tecnológicas com atributos do solo. Pela análise de componentes principais, brix, fibra, pureza, densidade do solo, tensão de pré-consolidação, percentual de agregados e areia fina explicaram a variação das duas primeiras componentes.

Palavras-chaves: Preparo do solo, produtividade, variáveis tecnológicas, *Saccharum spp.*

Soil physical attributes and productivity of sugarcane in soil tillage

Abstract: The objectives of this study were to verify the influence of tillage on the technological parameters of sugarcane and identify the relationship between these parameters and physical, chemical and soil mechanics. The study was conducted under field conditions at the Experimental Station of Cane Sugar Carpina (EECAC / UFRPE), located in the city of Carpina, PE. The experimental design was a randomized block design in a split plot with two systems cultivation (P1 - harrowing and beading; P2 - beading) and two varieties of sugarcane (V1 - RB86 7515; V2 - RB92 579), with 4 treatments (P1V1, P1V2, P2V1, P2V2) with 4 repetitions, totaling 16 installments. It was analyzed technological variables brix, pol, purity, ATR, AR, PC, fiber and physical, chemical and

mechanical soil attributes bulk density, moisture, organic carbon, preconsolidation stress, electrical conductivity, texture, Atterberg limits. Analysis of variance showed statistical difference only for brix. There was weak correlation between technological variables with soil properties. By principal component analysis, brix, fiber, purity, soil density, pre-consolidation pressure, percentage of aggregates and sand explained the variation of the first two components.

Key words: tillage system, yield, technological variables, *Saccharum spp.*

Introdução

O brix, a pol e a pureza são variáveis tecnológicas capazes de indicar a maturação da cana e que medem a quantidade de sólidos solúveis, a sacarose e a pureza da amostra de cana-de-açúcar. Pesquisas têm relacionado atributos físicos do solo com produtividade e variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar (RODRIGUES JÚNIOR et al., 2013) e demonstrado que as propriedades físicas do solo podem influir na composição química e tecnológica da cana-de-açúcar (BANGITA & RAO; 2012 e HORII, 2004). Gonçalves et al. (2014), verificaram que a ausência de tráfego ao longo das linhas de cultura, que mantiveram o solo na condição adequada para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, pode ter compensado os efeitos nocivos da compactação do solo sobre o desenvolvimento da cana.

A compactação do solo pode ser causada pela colheita mecanizada e pode comprometer o rendimento da cultura da cana-de-açúcar quando o solo é degradado (LIMA et al., 2013; RAMOS et al., 2013). Quando o solo é compactado, a porosidade de aeração decresce e a resistência do solo à penetração das raízes é incrementada (RAMOS et al., 2013).

Chen & Weil (2010) discutem que no plantio direto as raízes das plantas também contribuem na redução da compactação por oferecerem caminhos de mais baixa resistência para o crescimento de culturas subsequentes, por criarem espaços preferenciais classificados como bioporos, que variam de cultura para cultura. No caso da cana-de-açúcar, as variedades podem contribuir com maior ou menor quantidade de raízes. Ivo (2012) verificou que a variedade RB86 7515 apresentou maior quantidade de raízes em três anos em comparação com a variedade de R92 579 em 8 anos.

Em relação às necessidades da cultura para o pleno desenvolvimento, a variedade RB86 7515 apresenta o crescimento rápido, com maturação tardia, de alta produtividade agrícola. Esta variedade deve ser plantada em solos de média/baixa fertilidade e colhida em meados da safra ou bem no final, para explorar o rápido crescimento. Além disso, é tolerante à seca e tem-se adaptado bem aos solos arenosos (MARQUES & SILVA, 2008). A variedade RB92 579 é muito produtiva, exigente em água, com colheita no meio da safra. Comparações realizadas por Ivo (2012) apontam que ao menos 50% da quantidade de raízes tende a distribuírem-se nos primeiros 20 cm da camada de solo, para ambas as variedades e que a RB86 7515 possui quantidade de raízes mais acentuada em cana crua se comparada com cana queimada e com a variedade RB92 579.

Desta forma, os objetivos da presente pesquisa foram verificar a influência do preparo do solo sobre os parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar e identificar a relação dos atributos físicos, químico e mecânicos do solo com estas variáveis.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido em condição de campo na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC/UFRPE), situada no Município de Carpina, PE. O estudo foi realizado em um Argissolo Amarelo distrocoeso, classificado como franco arenoso (Tabela 1) com área de 0,88 ha, e se situa nas seguintes coordenadas 7°51'S de Latitude e 35°14'W Longitude e 178 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco.

Tabela 1. Caracterização física e química do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar

	Argila	Areia Fina	Areia Grossa	Silte	Ds	LP	LL	CO
0,00-0,20 m	127,50	216,14	516,13	139,20	1,49	16,39	21,02	1,68
0,20-0,40 m	129,33	219,60	504,93	143,63	1,65	16,09	20,03	1,50

Ds – densidade do solo (g.cm^{-3}); LP – limite de plasticidade (%); LL – limite de liquidez (%); CO – carbono orgânico (dag.kg^{-1})

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com dois modos de preparo do solo (P1 – gradagem e sulcagem; P2 – sulcagem) e duas variedades de cana-de-açúcar (V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579) com 4 tratamentos (P1V1, P1V2, P2V1, P2V2), com 4 repetições, totalizando 16 parcelas. Nas

parcelas foram aplicados diferentes preparos do solo e nas subparcelas foram duas variedades de cana-de-açúcar. Cada parcela experimental foi constituída de área de dimensões 26,00 × 16,00 m, nos quais foram abertos 23 sulcos com espaçamento de 1,10 m.

O plantio foi realizado em agosto de 2014 e o corte em novembro de 2015. A área útil para o cálculo da produtividade correspondeu a cana cultivada nos 13 sulcos centrais de cada parcela. A cana já queimada da parcela foi pesada, em kg, e dividida pela área, conforme a equação: $\text{produtividade} = \frac{\text{Peso total da parcela} \times 10}{\text{área útil da parcela em m}^2}$. Antes da colheita, foram coletadas 10 amostras de caule de cana-de-açúcar em cada parcela do tratamento. As variáveis analisadas foram: produtividade, brix (teor de sólidos solúveis), pol (teor de sacarose aparente do caldo), pureza, açúcares redutores do caldo (AR caldo), PC (% corrigida), ART (açúcar total recuperável), fibra, açúcares redutores da cana (AR cana). As variáveis tecnológicas foram analisadas pela empresa responsável pelo corte da cana. A determinação do Brix, pol, e fibra são obtidas por meio de refratômetro, leitura sacarimétrica e peso do bagaço úmido. As demais variáveis são obtidas indiretamente por estas medidas, conforme metodologia da Consecana (2006).

Foram aplicados no solo o preparo com gradagem e sulcagem (P1) e sulcagem (P2). A gradagem foi realizada com trator Massey Ferguson 4292 com a grade aradora e niveladora acoplada fabricante Baldan, modelo bia, com 16 discos de 30 cm de diâmetro e a sulcagem com o trator John Deere 6405 com o implemento sulcador de cana de três linhas fabricante baldan modelo bia, com espaçamentos de 1,1 m e profundidade de trabalho de 30-40 cm.

Adicionalmente, coletou-se amostra de solo no centro de cada parcela para análises dos seguintes atributos do solo: densidade do solo (DS), umidade do solo (w), textura, condutividade elétrica do extrato de saturação segundo (CEes), carbono orgânico (CO) conforme EMBRAPA (1997), densidade seca máxima ($D_{s_{\text{máx}}}$) conforme NBR 7182 (ABNT, 1986), porcentagem de agregados e seus índices conforme segundo Freire & Piedade Jr. (1979), Kemper & Rosenau (1986), limites de consistência, segundo NBR 6459 e NBR 7180 (1984), tensões de pre-consolidação, conforme Tavares et al. (2015).

Foi realizada a aferição do relevo original e área de solo mobilizada por meio do uso de perfilômetro, conforme Carvalho Filho et al. (2008). Para mensuração dos parâmetros de mobilização do solo, o perfilômetro foi usado em cada parcela, antes da passagem da ferramenta de corte no solo, para obter o perfil natural, e após a passagem

para medir a área transversal (mobilizada), sendo tomadas leituras no mesmo local e posicionamento.

As análises de variância foram efetuadas utilizando o pacote estatístico SAS, versão 9.2 (SAS INSTITUTE, 2008). Para a verificação das pressuposições do modelo, realizou-se o teste de esfericidade da matriz de variâncias e covariâncias entre tempos. A hipótese de esfericidade das matrizes de variância e covariância não foi rejeitada para todas as variáveis estudadas. Quando necessário efetuou-se comparação de médias entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Após verificar a normalidade dos dados, e observação de valores significativos na matriz de correlação ($>0,30$) para os parâmetros da cana e atributos do solo, os dados foram submetidos a análises por técnicas multivariadas de componentes principais.

Os dados para análise multivariada de componentes principais foram selecionados após a realização dos testes de multicolinearidade, a fim de se evitar problemas de confiabilidade da análise. A estatística multivariada foi empregada para estudar e visualizar relações entre os parâmetros da cana e atributos do solo, utilizando a rotação do eixo varimax normalizada para melhor interpretação dos resultados. Como resultado da análise de componentes principais, grande parte da variabilidade contida no conjunto de variáveis originais se concentra em um número pequeno de fatores.

Resultados e Discussão

O brix da variedade RB92 579 diferiu estatisticamente entre os preparos do solo (P1-gradagem+sucagem e P2-sulcagem) em que o preparo do solo com gradagem e sulcagem proporcionou maior índice de brix na variedade (Tabela 2). O brix da variedade RB86 7515 não diferiu entre si nem diferiu do brix da variedade RB92 579. As demais variedades tecnológicas não apresentaram diferença estatística para os tratamentos aplicados. O brix é uma variável que mede sólidos solúveis presentes na amostra e é indicativa da maturidade da cana, recomendando que o brix apresente a mesma proporção nas seções superior / inferior do colmo (Shrivastava et al., 2015).

Tabela 2. Média das variáveis tecnológicas das variedades de cana-de-açúcar RB86 7515 e RB92 579

	PROD (t.ha ⁻¹)	Brix	Pol	Pureza (%)	AR caldo	PC	ART (%)	Fibra (%)	AR cana
P1V1	97,03a	20,6ab	18a	87,2a	0,6a	15,6a	17a	13,8a	0,6a
P1V2	92,45a	21,46 ^a	18,9a	87,9a	0,6a	16,4a	17,8a	13,8a	0,6a
P2V1	97,09a	20,55ab	17,6a	85,6a	0,8a	14,7a	16,3a	14a	0,8a
P2V2	92,7a	19,055b	16,4a	85,6a	0,8a	13,9a	15,4a	13,8a	0,8a

Letras minúsculas diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%; PROD – Produtividade; Brix - Teor De Sólidos Solúveis; Pol - Teor de sacarose aparente do caldo; Ar Caldo - Açúcares redutores do caldo; Pc - % Corrigida; ART - Açúcar total recuperável; Ar Cana - Açúcares redutores da cana

Segundo Rípoli & Rípoli (2004), os valores recomendados para pol, pureza e ATR devem estar acima de 14, 85% e 14, respectivamente; as variáveis se enquadram nos valores recomendados(Tabela 3). O percentual de fibra excede ao limite de 11-13% recomendado. O AR (açúcar redutor) recomendado é <0,8% (Tabela 2), apenas em P1, gradagem e sulcagem, o teor encontra dentro do recomendado. Bangita & Rao (2012) verificaram que diferentes preparos do solo promoveram diferença estatística significativa para a produtividade da cana-de-açúcar, em que a mobilização do solo por meio de sulcador, acoplado de asas metálicas fixadas em cada lado da haste sulcadora, aumentou a produtividade de açúcar em 24% se comparado com o tratamento sem sulcador. A descompactação do solo da presente pesquisa pode ser a causa de variação da qualidade tecnológica observada em ambas as variedades de cana-de-açúcar, pois houve redução de densidade do solo e aumento de porosidade havendo maior estoque de água no solo,o que é benéfico para as culturas (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios de atributos de um Argissolo Amarelo distrocoeso antes do preparo (T1) e após o preparo (T2)

	Ds (g cm ⁻³)		W (%)		Pt (%)		Ds _{máx} (g cm ⁻³)		w _{crit} (%)		CO (dag.kg ⁻¹)	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
0,00-0,20 m												
P1V1	1,46	1,34a	12,03	9,97a	46,32	49,46a	1,81	1,84ab	11,94	12,06a	1,83	1,57a
P1V2	1,47	1,39a	10,98	9,43a	45,72	49,70a	1,83	1,87a	11,66	11,44a	1,38	1,55a
P2V1	1,48	1,37a	12,82	11,23a	45,86	48,50a	1,82	1,88a	11,84	10,88a	1,70	1,64a
P2V2	1,34	1,34a	12,14	12,35a	50,93	49,70a	1,84	1,82b	11,44	12,19a	1,90	1,65a
0,20-0,40 m												
P1V1	1,60	1,58a	13,27	12,83a	41,48	41,54a	1,83	1,78a	11,79	13,46a	1,50	1,35a
P1V2	1,64	1,53a	13,03	12,40a	39,65	44,77a	1,86	1,83a	10,97	13,19a	1,43	1,29a
P2V1	1,60	1,60a	13,84	12,48a	41,10	40,21a	1,83	1,80a	12,86	12,98a	1,50	1,26a
P2V2	1,63	1,56a	13,21	12,35a	40,30	42,80a	1,80	1,85a	11,74	12,10a	1,50	1,35a

Ds - densidade do solo; w – umidade do solo; Pt – porosidade total; Ds_{máx} - densidade seca máxima; w_{crit} - umidade crítica; CO - carbono orgânico; P1 – gradagem + sulcagem;P2 – sucagem; V1 – RB86 7515; V2 – RB92 579. Letras minúsculas diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10%.

Antes de utilizar a análise multivariada, algumas variáveis tecnológicas e atributos do solo foram removidos para evitar multicolinearidade observada com o uso de todos os dados. Das variáveis tecnológicas e atributos do solo habilitados para a análise dos

componentes principais é apresentado a matriz de correlação dos dados, Tabela 4. Correlações significativas foram observadas entre Brix e $D_{s_{\max}}$, e fibra e D_s e σ_{p16} . Cerri & Magalhães (2012) também observaram fracas correlações entre propriedades do solo (matéria orgânica e índice de cone e CEes) com produtividade da cana-de-açúcar.

Tabela 4. Correlação de Pearson entre as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar e atributos de um Argissolo Amarelo distrocoeso

Variáveis	D_s	w	Argila	Areia fina	Silte	$D_{s_{\max}}$	Agregados		Lp	CEes	σ_{p16}
							>2mm	1-0,5 mm			
Brix	0,358	-0,385	-0,100	0,005	0,024	0,503*	-0,196	-0,034	-0,253	-0,340	0,019
Pureza	0,441	-0,051	-0,023	0,196	0,242	0,275	-0,043	-0,041	-0,268	-0,047	0,307
Fibra	-0,662*	-0,115	0,090	0,217	-0,322	-0,160	0,252	-0,068	0,254	-0,077	-0,498*
D_s	1	0,137	-0,055	-0,160	0,255	0,004	-0,066	-0,145	-0,171	0,414	0,363
w	0,137	1	0,166	-0,366	0,231	-0,338	0,223	-0,378	0,473	0,375	0,101
Argila	-0,055	0,166	1	0,049	0,197	-0,279	0,085	0,085	0,298	-0,105	-0,018
Areia fina	-0,160	-0,366	0,049	1	0,274	0,336	-0,366	0,570*	-0,005	0,120	-0,098
Silte	0,255	0,231	0,197	0,274	1	0,074	-0,385	0,340	0,443	0,125	-0,024
$D_{s_{\max}}$	0,004	-0,338	-0,279	0,336	0,074	1	-0,509*	0,298	-0,122	-0,388	-0,271
Agregados >2mm	-0,066	0,223	0,085	-0,366	-0,385	-0,509	1	-0,642*	-0,224	0,041	0,129
Agregados 1-0,5 mm	-0,145	-0,378	0,085	0,570*	0,340	0,298	-0,642*	1	0,120	-0,071	-0,224
Lp	-0,171	0,473	0,298	-0,005	0,443	-0,122	-0,224	0,120	1	0,110	-0,370
CEes	0,414	0,375	-0,105	0,120	0,125	-0,388	0,041	-0,071	0,110	1	0,474
σ_{p16}	0,363	0,101	-0,018	-0,098	-0,024	-0,271	0,129	-0,224	-0,370	0,474	1

*- significativo a 5%. D_s - Densidade do solo; w - umidade do solo; $D_{s_{\max}}$ - Densidade seca máxima; Lp - limite de plasticidade; CEes - Condutividade elétrica no extrato de saturação; σ_{p16} - Tensão de pré-consolidação na umidade de 16%

As seis primeiras componentes principais explicaram 84% da variância dos dados (Tabela 5). Rodrigues Júnior et al. (2013) verificou que foram necessários sete componentes para explicar mais de 80% dos dados e que foram utilizados 13 parâmetros de um total de 29, devido a problemas de multicolinearidade, para realização da análise de componentes principais.

Tabela 5. Percentagem da variância explicada pelos primeiros seis fatores (F)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Autovalor	3,211	2,923	2,288	1,456	1,101	0,832
Variabilidade (%)	22,934	20,876	16,340	10,400	7,863	5,945
% acumulada	22,934	43,810	60,150	70,549	78,413	84,357

O primeiro componente principal explicou 22,93%, em que o brix, a pureza, a $D_{s_{\max}}$ e os agregados >2mm são as variáveis mais importantes que contribuem para esta PC, em que a porcentagem de agregados >2mm é o único escore negativo (Tabela 6). A proporção acumulada entre o primeiro e o segundo fator explicou 43,81% da variabilidade e a fibra, D_s , areia fina, agregados 1-0,5mm, e σ_{p16} foram as variáveis de maior carga

fatorial selecionado dentro do segundo fator e os escores de Ds e σ_{p16} são positivos. A w, LP e silte constituem com o terceiro fator. Rodrigues Júnior et al. (2013) observaram que propriedades químicas do solo, como fósforo e potássio, foram mais representativas para explicar a variabilidade do conjunto de dados.

Tabela 6. Cargas fatoriais das variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar atributos do solo para os três primeiros fatores

	F1	F2	F3
Brix	0,742	0,144	-0,315
Pureza	0,693	0,416	-0,012
Fibra	-0,590	-0,601	-0,213
Ds	0,416	0,688	0,244
w	-0,469	0,408	0,506
Argila	-0,203	-0,074	0,341
Areia fina	0,383	-0,493	0,248
Silte	0,311	-0,034	0,782
D _S ^{máx}	0,694	-0,374	-0,165
Agregados >2mm	-0,580	0,409	-0,419
Agregados 1-0,5 mm	0,425	-0,592	0,379
Lp	-0,321	-0,308	0,671
CEes	-0,200	0,453	0,488
σ_{p16}	0,113	0,721	0,058

* correspondem para cada observação ao fator para o qual o coseno quadrado é o maior. Ds - Densidade do solo; w - umidade do solo; D_S^{máx} - Densidade seca máxima; Lp - limite de plasticidade; CEes - Condutividade elétrica no extrato de saturação; σ_{p16} - Tensão de pré-consolidação na umidade de 16%

Pela Figura 1, pureza, brix e D_S^{máx} estão nos quadrantes à direita e são as variáveis com maior contribuição para a variação total do primeiro fator, por estarem próximas do círculo unitário. O percentual de agregados >2 mm contribuiu negativamente e por isto localiza-se no quadrante oposto, a esquerda. Pelo afastamento das retas entre si, pode-se dizer que as variáveis tecnológicas brix e pureza estão pouco correlacionadas com os atributos do solo. No segundo fator, σ_{p16} e Ds encontram-se no mesmo quadrante superior a direita, a fibra encontra-se no quadrante oposto, apresentando correlação inversa com os citados atributos do solo. A areia fina e o percentual de agregados 1-0,5 mm, de escore negativo, se mostraram pouco correlacionados com outras variáveis, localizando-se no quadrante inferior direito. A LP, embora tenha se correlacionado com a fibra, não apresentou contribuição significativa para o segundo fator.

Pelos resultados das componentes principais, verifica-se que as variáveis tecnológicas apresentam relação com atributos do solo relacionados a estrutura, fração mais grosseira do solo e agregação. No caso das variáveis umidade ou finos do solo, ambas possuem a capacidade de influenciar na concentração de sais e nutrientes e a umidade muito é dependente de fatores climáticos. Em vista disto, se observa variação na

produtividade e/ou parâmetros tecnológicos em função de medidas da pluviosidade, irrigação e manejo da cana-de-açúcar, tomadas ao longo do ciclo da cultura (FARIAS et al., 2009; MACEDO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2015; SIMÕES NETO, 2008).

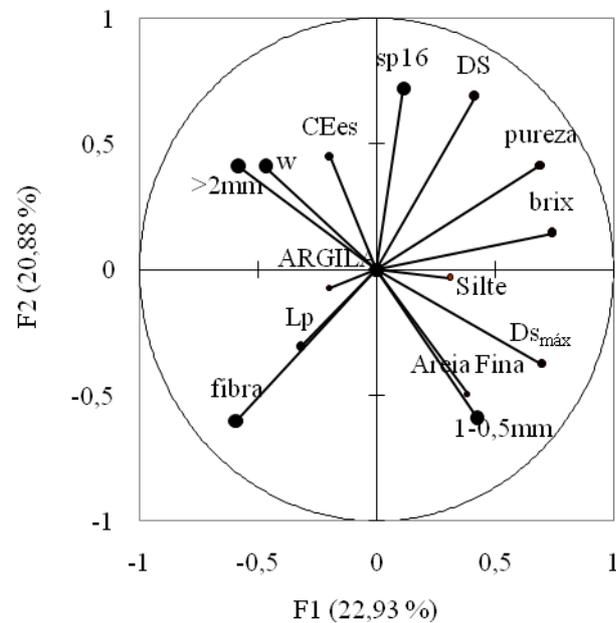


Figura 1. Diagrama de ordenação unitária da primeira (D1) e segunda (D2) componente principal

Conclusão

1. O brix da variedade RB92 579 deferiu estatisticamente para os tratamentos empregados;
2. O brix, a pureza, a DS_{máx} e os agregados >2mm são as variáveis que melhor explicam o primeiro componente;
3. A fibra, o DS, σ_{p16} , Areia fina e os agregados 1-0,5mm são as variáveis que melhor explicam o segundo fator;
4. Fracas correlações foram encontradas para os parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar e atributos do solo;

Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6459: Solo - Determinação do

- limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7182: Solo. Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 11p.
- Bangita, B.; Rao, B. K. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. *Geoderma*, v.189–190, p.351–356, 2012.
- Carvalho Filho, A.; Bonacim, J. L. G.; Cortez, J. W.; Carvalho, L. C. C. Mobilização de um Latossolo Vermelho acriférrico em função de preparo do solo. *Bioscience Journal*, v.24, p.1-7, 2008.
- Cerri, D. G. P.; Magalhães, P. S. G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.613-620. 2012.
- Chen, G.; Weil, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant & Soil*, v.331, p.31–43, 2010.
- CONSECANA. Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar, Álcool do Estado de São Paulo, 2006. Manual de Instruções, 5 ed. CONSECANA, Piracicaba.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro: centro nacional de pesquisa de solos, 2.ed., 1997. 212p.
- Farias, C. H. A.; Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Dantas Neto, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.419–428, 2009.
- Freire, W. J.; Piedade Júnior, C. O. Módulo de finura dos agregados do solo como índice de estabilidade estrutural. *Engenharia Agrícola*, v.3, p.29-36, 1979
- Gonçalves, W. G.; Severiano, E. C.; Silva, F. G.; Costa, K. A. P.; Guimarães Junnyor, W. S.; Melo, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a brazilian cerrado Latosol Growing sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.432-443, 2014.
- Horii, J., 2004. A Cana-de-açúcar como matéria-prima. ESALQ - Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, Piracicaba.
- Ivo, W. M. P. M. Dinâmica da matéria orgânica em áreas de produção de cana-de-açúcar colhida crua e queimada, no Nordeste do Brasil. Recife: UFPE, 2012, 144p. Dissertação Mestrado.

- Kemper, W. D.; Rosenau, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1.* Madison: American Society of Agronomy. p.425-442,1986.
- Lima, R. P. Modelos de capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo distrocoeso. Recife: UFRPE, 2013. 58 f. Dissertação Mestrado.
- Macedo, G. A. R.; Costa, E. L.; Viana, M. C. M. Características agronômicas e químicas das variedades de cana-de-açúcar RB83-5486 e RB86-7515 sob irrigação e sequeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.599–603, 2012.
- Marques, T. A.; Silva, W. H. Crescimento vegetativo e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.8, p.54-60, 2008.
- Oliveira, A. R.; Braga, M B.; Walker, A. M. Comportamento vegetativo e qualidade tecnológica de cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico em condições semiáridas do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.8, p.525-541, 2015.
- Ramos, F. T.; Ramos, D. T.; Maia, J. C. S.; Serafim, M. E.; Azevedo, E. C.; Roque, M. W. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-amarelo: com e sem reuso de amostras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.129–136, 2013.
- Ripoli, T. C. C.; Ripoli, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros & Marques, 2004. 302p.
- Rodrigues Jr., F. A.; Magalhães, P. S. G.; Franco, H. C. J. Soil attributes and leaf nitrogen estimating sugar cane quality parameters: Brix, pol and fibre. *Precision Agriculture*, v.14, p.270–289, 2013.
- Shrivastava, A. K.; Solomon, S.; Raí, R. K.; Singh, P.; Chandra, A; Jain, R.; Shukla, S. P. Physiological interventions for enhancing sugarcane and sugar productivity. *Sugar Tech*, v.3, p.215–226, 2015.
- Simões Neto, D. E. Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do Estado de Pernambuco. Recife: UFRPE, 2008. 105p. Tese doutorado.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Pedrosa, E. M. R.; Siqueira, G. M.; Magalhães, A. G. Spatial dependence of physical attributes and mechanical properties of Ultisol in a sugarcane field. *The Scientific World Journal*, v. 2015, p.1-10, 2015.