



VARIÁVEIS FÍSICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE PREPARO NA REFORMA DE CANAVIAL

Laércio Alves de Carvalho¹, Iurhy da Silva Rezende², Elói Panachuki², Carlos Antonio da Silva Junior³, Elaine Novak¹ e Guilherme Fernando Capristo Silva³

¹Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul (UEMS), Cidade Universitária de Dourados, Dourados, MS, Brasil. E-mail: lcarvalh@uems.br;

²Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade de Aquidauana, Aquidauana, MS, Brasil. E-mail: eloip@uems.br;

³Universidade Estadual de Maringá (UEM), Departamento de Agronomia, Maringá, PR, Brasil. E-mail: carlos-junior89@hotmail.com.

Recebido em: 03/01/2014 – Aprovado em: 04/04/2014 – Publicado em: 12/04/2014

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos do solo de um Neossolo Quartzarênico órtico do Cerrado Sul-Matogrossense após preparo mecanizado para reforma de canavial e sua relação com a produtividade. Selecionaram-se as operações de preparo do solo (subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; aração com arado aiveca + gradagem niveladora; subsolagem em área total + gradagem niveladora; subsolagem em área total; e gradagem intermediária). Para tanto, amostras deformadas e indeformadas de solo foram determinadas 17 meses após o preparo do solo em duas camadas (0,15-0,25 e 0,25-0,35 m). Foram avaliadas a textura do solo, densidade de partícula (Dp), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), resistência do solo à penetração (Rp) e densidade do relativa (Drel). Empregou-se o delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas e cinco repetições. As operações de preparo do solo com combinações entre subsolagem na linha de plantio + grade niveladora; arado de aiveca + grade niveladora ou subsolagem em área total + grade niveladora proporcionaram melhor desempenho na produtividade da cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação física do solo; compactação do solo; preparo do solo; *Saccharum* spp.

PHYSICALS INDICATORS OF SOIL QUALITY IN DIFERENTS SYSTEMS PREPARING IN AREA OF SUGARCANE FALLOW

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the soil physical properties of an Entisol Cerrado South Grosso after preparation for mechanized sugar-cane and its relation to productivity. We selected operations of tillage (subsoiling in the row harrow + leveling; moldboard plowing + disking leveling, subsoiling in total area + leveling disk harrow; subsoiling in total area, and harrowing intermediate). For this, and undisturbed samples of soil were determined 17 months after tillage in two layers (0.15-0.25 and 0.25-0.35 m). We evaluated soil texture, particle density (Pd), bulk

density (Bd), total porosity (Tp), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), soil penetration resistance (Pr) and relative density (Bd_{rel}). We used a completely randomized split plot with five replications. The operations of tillage with combinations of subsoiling in the row + harrows, moldboard plowing + harrowing and subsoiling in total area + harrowing resulted in better performance on the productivity of sugarcane.

KEYWORDS: *Saccharum* spp., tillage, physical evaluation of soil, soil compaction.

INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se mundialmente pela extensa área agrícola ocupada pela cana-de-açúcar e proeminente produção de etanol e açúcar em sistemas altamente mecanizados que podem modificar as propriedades físicas do solo, podendo ocasionar certa compactação (SOUZA et al. 2012). Entre as operações para eliminar possíveis problemas de compactação destaca-se o preparo de solo, em que rompe camadas compactadas favorecendo o desenvolvimento inicial da cultura. O papel fundamental das operações de preparo é criar condições ideais para o desenvolvimento das raízes, visando longevidade das culturas (TAVAREZ et al. 2010). Entre essas operações com grande aceitação nas lavouras canavieiras, seja no plantio ou no cultivo de soqueiras, tem se destacado a subsolagem. Essa operação visa o rompimento de camadas compactadas em subsuperfície.

Para CARVALHO et al. (2011), o preparo de solo para implantação do canavial representa uma etapa crucial na longevidade da cultura, em que o solo será novamente revolvido após o quinto ou sexto corte da cana-de-açúcar, dependendo da variedade e/ou produtividade. VIEIRA & KLEIN (2007) afirmam que dentre os componentes de manejo, o preparo do solo é a atividade que mais influencia nos atributos físicos, por alterar sua estrutura e podendo modificar variáveis relacionadas (VIEIRA 1985). Dessa forma, a realização de um bom preparo inicial do solo pode interferir de forma positiva ou negativa caso não seja bem efetuado. De acordo com CAMILOTTI et al. (2005), a oportunidade para a descompactação do solo é justamente na reforma do canavial. Nessa ocasião, a escolha dos implementos que efetivamente descompactam o solo é muito importante.

A compactação dos solos em agrossistemas canavieiros tem sido atribuída principalmente à colheita mecanizada em condições de elevados conteúdos de água no solo (PANKHURST et al. 2003), provocando redução da porosidade total e consecutivo aumento na densidade do solo, principalmente na profundidade de 0,20-0,40 m, justificado pela ausência de revolvimento do solo (CARVALHO et al. 2011). Fator esse determinante na compactação, em que compromete a sustentabilidade do sistema, modificando a estrutura do solo e afetando a produtividade e longevidade dos canaviais (DIAS JÚNIOR & PIERCE 1996, SILVA et al. 2000, OLIVEIRA et al. 2003)

A fim de reduzir a compactação ocasionada pelas operações de corte, carregamento e transporte, na colheita mecanizada deve ser feito um planejamento para a escolha do sistema de preparo de solo em cada ambiente de produção. Para SILVA JUNIOR & CARVALHO (2010) a escolha do preparo pode ser feita por meio do uso de indicadores de qualidade física do solo, como a densidade, porosidade e resistência à penetração. Além disso, pela suscetibilidade à compactação pelo ensaio de Proctor normal, determinando a densidade do solo máxima para uma umidade ótima de compactação do solo (VARGAS 1977).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento do solo e da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo, numa área de reforma de um Neossolo Quartzarênico órtico.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no município de Rio Brillante, MS, Brasil (Lat. 21°50'S e Long. 53°57'W com altitude média de 312 m.) em um Neossolo Quartzarênico órtico (EMBRAPA 2006). O clima foi classificado como Aw conforme Köppen-Geiger, com precipitação média anual variando de 1.500 a 1.700 mm (Figura 1).

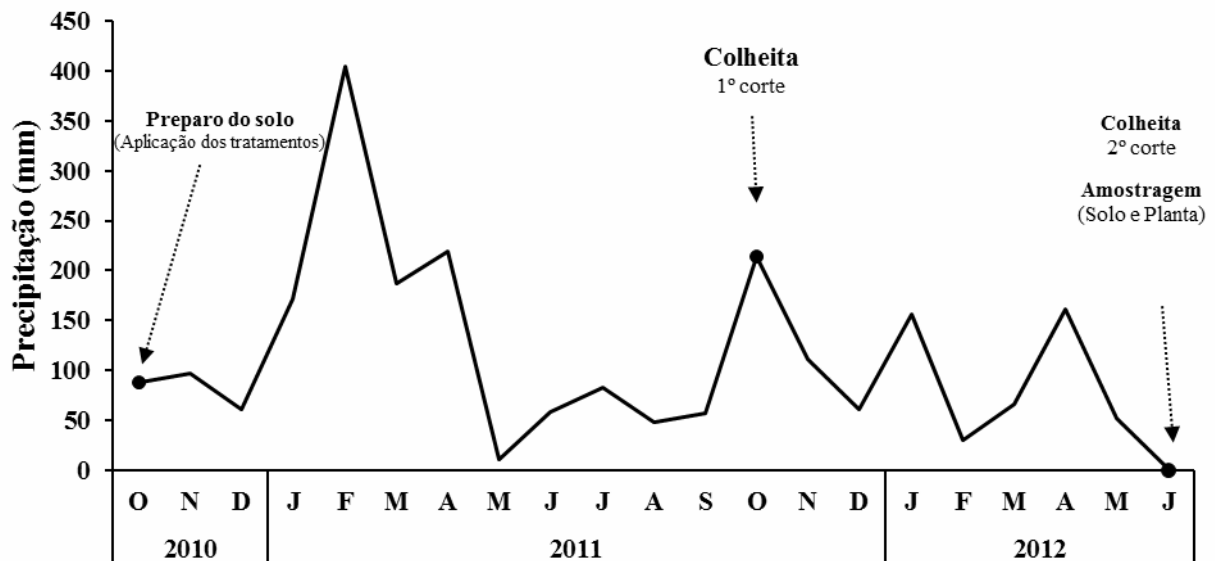


FIGURA 1. Valores médios mensais de precipitação pluvial na área do experimento. As letras representam as iniciais de cada mês, de janeiro até dezembro.

Realizou-se o preparo do solo em outubro de 2010 em área anteriormente explorada com cana-de-açúcar sob sistema de colheita mecanizada com seis cortes sucessivos. Pela necessidade de reforma do canavial, foram instalados os tratamentos com cinco sistemas de preparo do solo, após a dessecação com herbicida da soqueira: SI+Gn – subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; A+Gn – aração com arado aiveca + gradagem niveladora; St+Gn – subsolagem em área total + gradagem niveladora; St – subsolagem em área total; e Gi – gradagem intermediária. O plantio da variedade RB855156 foi realizado com espaçamento de 1,5 m entre linhas em ambiente médio de produção. A correção química do solo foi realizada durante a realização do preparo do solo.

O preparo do solo foi executado com os seguintes implementos: subsolador canavieiro, constituído de cinco hastes com ponteiros tipo asas, grade aradora constituída de 18 discos com 32” de diâmetro, uma grade intermediária de 28 discos com diâmetro de 28” e uma grade niveladora com 52 discos de 18” de diâmetro. A profundidade média de atuação de cada implemento foi: subsolador (0,45 m); grade aradora (0,34 m); grade intermediária (0,27 m), e; grade niveladora (0,18 m). O subsolador em sítio específico (linha de cana), atuou com cinco hastes. Todas as operações de preparo de solo foram realizadas ao mesmo dia, estando o solo próximo a faixa de friabilidade.

A coleta de amostras foi realizada 20 meses após o preparo do solo. Na avaliação dos atributos físicos do solo, cada ponto foi coletado em uma área de

10.000 m² com locações distantes 20 m entre si e em uma subárea útil demarcada de 200 m² nas camadas de 0,15-0,25 e 0,25 a 0,35 m de profundidade. Em todas as amostragens, utilizou-se da entrelinha, distanciada 0,30 m da linha de cultivo. Todas as áreas apresentavam um relevo plano. As amostras com estrutura deformada foram coletadas em cada sistema de preparo em cinco pontos distintos para análise granulométrica, densidade de partícula e a densidade do solo relativa por meio da densidade do solo máxima obtida pelo ensaio de Proctor normal. Foram utilizados 25 kg de solo de uma amostra composta em cinco pontos de amostragem por meio da abertura de trincheiras. Utilizaram-se também amostras indeformadas com objetivo da avaliação da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Nessa finalidade foram utilizados anéis metálicos de volume conhecido usados no amostrador de Umland. Os anéis foram centralizados no interior de cada camada amostrada.

A quantificação granulométrica das frações de argila, silte e areia foi realizada mediante a passagem do solo amostrado em peneira de 2 mm por meio da dispersão com água e NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta (16 horas) e densidade de partículas pelo método do balão volumétrico com álcool etílico, conforme a EMBRAPA (1997).

A determinação da densidade e da microporosidade do solo foram realizadas nas amostras indeformadas. Calculou-se a porosidade (total, macro e microporosidade) como o conteúdo de água em solo submetido à saturação por capilaridade com imersão de aproximadamente $\frac{3}{4}$ dos cilindros em bandejas de plástico com água. O tempo de preenchimento dos poros foi de 48 horas, onde as amostras foram submetidas à tensão de -0,006 MPa para determinação da microporosidade (poros < 50 µm Ø) e capacidade de campo do solo (OLIVEIRA et al. 2003) utilizando uma mesa de tensão adaptada de KIEHL (1979). Estimaram-se os macroporos (poros ≥ 50 µm Ø) como a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado e o conteúdo de água do solo após a aplicação do potencial de -0,006 MPa. O volume de microporos foi estimado como sendo o conteúdo de água retido no potencial de -0,006 MPa. Após a drenagem das amostras, estas foram secas em estufa a 105°C por 24 h para determinação da densidade do solo (BLAKE & HARTGE 1986).

Avaliou-se também a resistência do solo à penetração em duas situações e com dois aparelhos. Utilizando as amostras indeformadas aferiu-se medidas com a umidade na capacidade de campo (Rp_{cc}) com penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA933, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados (TORMENA et al. 2007). Aferiram-se três mensurações na superfície do solo de cada anel. A resistência do solo à penetração também foi medida nas condições de campo sem o controle da umidade na amostragem (Rp). Para isso foi usado um penetrômetro eletrônico Falker, modelo penetrológ PLG1020. Em cada sistema de preparo foram feitas cinco medidas aleatoriamente na entrelinha do cultivo e a 0,30 m da linha, até a profundidade de 0,35 m. A aquisição dos dados por este equipamento é feita por esforço manual, onde a ponta cônica e a haste do equipamento foram inseridas no solo por meio da força do operador.

O ensaio de Proctor normal foi realizado com aparelho da marca Soiltest modelo CN4230, sendo a amostra compactada em anel metálico de 0,001 m³, por meio de um soquete com massa de 2,5 kg, com aplicação de 25 golpes por corpo de prova, em uma altura de queda livre de 0,305 m, semelhante ao que é preconizado na Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT 1986). A partir dos pares de dados,

da Ds em função da umidade gravimétrica, fez-se o ajuste da equação matemática de 2º grau (Equação 1):

$$Ds = b_0 + b_1Ug + b_2Ug^2$$

(1)

sendo, b_0 , b_1 e b_2 os estimadores dos parâmetros ajustados na curva de compactação do solo.

Com a derivada da Equação 1, calculou-se a umidade ótima de compactação ($Ug_{ót}$) (Equação 2) e a densidade do solo máxima ($Ds_{máx}$) (Equação 3).

$$Ug_{ót} = (- b / 2a)$$

(2)

$$Ds_{máx} = - (b^2 - 4ac)/4a$$

(3)

Para determinar a densidade relativa (Ds_{rel}), utilizou-se a razão entre a Ds e a $Ds_{máx}$ conforme Beutler et al. (2005):

$$Ds_{rel} = (Ds_{campo}/Ds_{máx}) \times 100$$

(4)

O resultado da produção agrícola foi expresso em toneladas de colmos por hectare (TCH) por meio do corte manual da estrutura da parte aérea na área útil da parcela. Os atributos tecnológicos, açúcares totais recuperáveis (ATR), pureza do caldo (PZA), açúcares polarizáveis da cana (PC), açúcares polarizáveis (POL) e a porcentagem de fibra foram determinados em laboratório.

Assim, os dados foram submetidos à análise de variância, seguindo delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas, no qual a parcela principal foi constituída pelos preparos de solo e as subparcelas, pelas profundidades analisadas. Quando o resultado da análise de variância foi significativo ($P < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classe textural do solo foi definida como franco-arenoso, mesmo ocorrendo variações nos conteúdos de argila, silte e areia nas áreas de cada sistema de preparo (Tabela 1). Onde o teor de argila foi menor, houve tendência à classe textural areia-franca. Pelo tamanho das áreas é possível que apresente algumas variações em termos de granulometria, comprovado pelas diferenças significativas nos conteúdos de argila e areia. No entanto, os valores superiores de argila em camada subsuperficial devem ser atribuídos principalmente à translocação de argila do horizonte A e à sua acumulação no horizonte B (OLIVEIRA et al. 2010). Os valores médios da densidade de partícula pouco variaram, indicando homogeneidade das áreas nessa característica do solo. As pequenas variações podem ser em função do carbono orgânico do solo conforme (VIANA et al. 2011).

TABELA 1. Características granulométricas, densidade de partícula (Dp), densidade do solo máxima (Ds_{máx}) e umidade ótima de compactação (Ug_{ót}) médios observados em Neossolo Quartzarênico órtico submetido a diferentes sistemas de preparo⁽¹⁾.

Sistema de Preparo ⁽²⁾	Argila ⁽²⁾ 1	Silte g kg ⁻¹	Areia g kg ⁻¹	Classe Textural	Dp 3 Mg m ⁻³	Ds _{máx} kg kg ⁻¹	Ug _{ót} kg kg ⁻¹
.....Camada (0,15 a 0,25 m).....							
Sl+Gn	153,12 abA	51,78 aA	795,10 aA	Franco-arenoso	2,62	1,79	0,12
A+Gn	133,75 abB	62,85 aA	803,40 aA	Franco-arenoso	2,62	1,97	0,11
St+Gn	119,17 bA	75,83 aA	805,00 aA	Franco-arenoso	2,73	1,92	0,11
St	167,63 aA	79,97 aA	752,40 bA	Franco-arenoso	2,69	1,92	0,11
Gi	133,50 bB	64,90 aA	801,60 aA	Franco-arenoso	2,70	1,92	0,11
.....Camada (0,25 a 0,35 m).....							
Sl+Gn	151,38 abA	56,50 aA	792,12 abA	Franco-arenoso	2,64	1,88	0,12
A+Gn	158,59 abA	68,16 aA	773,25 bcB	Franco-arenoso	2,73	1,92	0,12
St+Gn	132,50 bA	61,20 aA	806,30 aA	Franco-arenoso	2,65	1,99	0,11
St	170,78 aA	74,72 aA	754,50 cA	Franco-arenoso	2,71	1,90	0,10
Gi	181,75 aA	53,65 aA	764,60 bcB	Franco-arenoso	2,68	1,90	0,11
F (preparo)	6,70**	2,29 ^{ns}	12,79**	-	1,20 ^{ns}	-	-
F (camada)	11,84**	0,86 ^{ns}	9,52**	-	0,22 ^{ns}	-	-
DMS (preparo)	34,03	31,39	29,41	-	0,13	-	-
DMS (camada)	23,80	21,18	20,17	-	0,09	-	-
CV (preparo)	13,05	28,57	2,19	-	2,87	-	-
CV (camada)	12,01	24,73	1,95	-	2,72	-	-

⁽¹⁾ Letras minúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e maiúsculas comparam médias de camadas de um mesmo tratamento pelo teste de Tukey (P<0,05). ^{ns}, * e **, não significativo, significativo a 1 e 5%, respectivamente. ⁽²⁾ Sl+Gn: subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; A+Gn: arado aiveca + gradagem niveladora; St+Gn: subsolagem em área total + gradagem niveladora; St: subsolagem em área total, e; Gi: gradagem intermediária. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação.

Pelas derivadas das equações ($R^2 > 0,71$) foram obtidas a densidade máxima do solo (Ds_{máx}) e a umidade gravimétrica ótima (Ug_{ót}). Observou-se um

distanciamento das curvas de compactação do solo na $D_{s\text{máx}}$ sob as diferentes condições dos preparos do solo, mesmo com a ocorrência de uma classe textural para todas as áreas (Tabela 2). Além das variações no conteúdo de argila, essa constatação pode ser atribuída ao revolvimento das camadas de solo, modificando e incorporando a matéria orgânica da superfície em todo o perfil da camada arável. BRAIDA et al. (2006) relatam que a redução da densidade do solo e da $D_{s\text{máx}}$ ocorre com o aumento do teor de matéria orgânica, sendo que também pode aumentar a $U_{g\text{ót}}$. Nas condições do trabalho, a $U_{g\text{ót}}$ permaneceu com pouca alteração nos valores (0,10 a 0,12 kg kg⁻¹). Assim, verifica-se que para todos os sistemas de preparo, a densidade do solo será máxima quando houver trafegabilidade de maquinários com as condições de umidade supracitada.

TABELA 2. Coeficientes de ajuste de um polinômio de 2º grau ($D_s = a U^2 + b U + c$) observados em Neossolo Quartzarênico órtico submetido a diferente sistemas de preparo.

Sistema de Preparo ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b	c	R ²	$D_{s\text{máx}}$..Mg m ⁻³ ...	$U_{g\text{ót}}$...kg kg ⁻¹ ...
..... Camada (0,15 a 0,25 m).....						
<i>Sl+G</i>	-28,08	6,91	1,36	0,89	1,79	0,12
<i>A+Gn</i>	-136,23	29,79	0,34	0,94	1,97	0,11
<i>St+Gi</i>	-59,24	13,42	1,16	0,86	1,92	0,11
<i>St</i>	-164,87	39,16	-0,40	0,92	1,92	0,11
<i>Gi</i>	-95,45	21,06	0,73	0,92	1,92	0,11
..... Camada (0,25 a 0,35 m).....						
<i>Sl+G</i>	-64,00	15,41	0,95	0,88	1,88	0,12
<i>A+Gn</i>	-77,25	18,36	0,83	0,81	1,92	0,12
<i>St+Gi</i>	-124,62	27,25	0,50	0,90	1,99	0,11
<i>St</i>	-38,09	7,41	1,53	0,79	1,90	0,10
<i>Gi</i>	-99,00	22,16	0,66	0,94	1,90	0,11

⁽¹⁾ *Sl+Gn*: subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; *A+Gn*: arado aiveca + gradagem niveladora; *St+Gn*: subsolagem em área total + gradagem niveladora; *St*: subsolagem em área total, e; *Gi*: gradagem intermediária. ⁽²⁾ Coeficiente de ajuste (a, b, c) da equação de segundo grau.

Não foi observado efeito significativo entre as médias de densidade do solo sob os sistemas de preparo e entre as camadas avaliadas (Tabela 3). Na camada de 0,15 a 0,25 m, o menor e maior valor de densidade do solo foi encontrado no sistema de preparo utilizando a *St* e *Gn* com valor iguais a 1,74 e 1,80 Mg m⁻³, respectivamente. O uso do preparo envolvendo duas operações (*St+Gn*) apresentou valor médio de 1,79 Mg m⁻³. Já o preparo envolvendo apenas uma operação (*Gi*), sem preparo secundário, se mostrou mais sensível para elevados valores da densidade do solo. Ainda na mesma camada, a *Sl+Gn* e *A+Gn* ficaram com valores médios intermediários em comparação aos maiores e menores valores encontrados. Os menores valores podem estar relacionados com a eficiência de rompimento da compactação na subsolagem em área total (*St*) sem o intenso revolvimento do solo. Para a *A+Gn* já era esperado valores de intermediários a inferiores, pois o revolvimento do solo promovido pelo uso da aração e gradagem niveladora, pode causar uma intensa pulverização do solo, próximo à superfície (SOUZA et al. 2005).

TABELA 3. Densidade do solo (Ds), densidade do solo relativa (Ds_{rel}), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (Pt) médios observados em Neossolo Quartzarênico órtico submetido a diferentes sistemas de preparo⁽¹⁾.

Sistema de Preparo ⁽²⁾	Ma	Mi	P _t	Relação Mi/Ma
	%.....			
Camada (0,15 a 0,25 m).....			
<i>Sl+Gn</i>	7,14 abA	22,34 aA	28,19	3,13:1
<i>A+Gn</i>	7,73 abA	21,06 abcA	26,88	2,72:1
<i>St+Gn</i>	4,99 bA	21,90 abA	27,05	4,39:1
<i>St</i>	8,98 aA	19,37 bcA	28,35	2,16:1
<i>Gi</i>	9,32 aA	18,93 cA	28,05	2,03:1
Camada (0,25 a 0,35 m).....			
<i>Sl+Gn</i>	3,68 bA	23,61 aA	26,01	6,41:1
<i>A+Gn</i>	7,64 aA	22,41 aA	30,05	2,93:1
<i>St+Gn</i>	7,01 abA	21,66 abA	27,98	3,08:1
<i>St</i>	8,18 aA	19,45 bA	27,64	2,37:1
<i>Gi</i>	8,93 aA	20,77 abA	29,71	2,32:1
F (preparo)	9,61**	8,28**	0,88 ^{ns}	-
F (camada)	0,90 ^{ns}	3,84 ^{ns}	0,58 ^{ns}	-
DMS (preparo)	3,33	2,87	4,56	-
DMS (camada)	2,66	2,04	3,49	-
CV (preparo)	22,31	7,69	8,55	-
CV (camada)	27,47	7,34	9,47	-

⁽¹⁾ Letras minúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e maiúsculas comparam médias de camadas de um mesmo tratamento pelo teste de Tukey (P<0,05). ^{ns}, * e **: não significativo, significativo a 1 e 5%, respectivamente. ⁽²⁾ Sl+Gn: subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; A+Gn: arado aiveca + gradagem niveladora; St+Gn: subsolagem em área total + gradagem niveladora; St: subsolagem em área total, e; Gi: gradagem intermediária. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação.

Na camada de 0,25 a 0,35 m foram encontrados os menores valores da densidade do solo na A+Gn e St+Gi, com 1,74 e 1,73 Mg m⁻³ respectivamente. Já a Sl+G mostrou-se mais elevada nesta camada, com valor médio de 1,79 Mg m⁻³. Estes resultados são compatíveis com STONE & SILVEIRA (2001) que verificaram aumento no valor da densidade do solo após a camada de 0,10 m, em solos preparados com grade pesada. Usando a St ou Gi, a densidade foi de 1,76 Mg m⁻³.

Comparando quantitativamente os solos pela densidade do solo relativa (relação entre a Ds e a Ds_{máx}), o sistema de preparo Sl+Gn promoveu os maiores valores nas duas camadas avaliadas. Observando todos os tratamentos na camada de 0,15 a 0,25 m, os valores variaram de 90 a 99% e 87 a 94% na camada subsequente. Contrastando as camadas, foi observada diferença significativa quando a área de renovação foi submetida ao preparo com St+Gn. A densidade do solo relativa diminuiu conforme o aumento da profundidade. VIANA et al. (2011) encontraram valores de densidade relativa de 82% em solo cultivado com cana-de-açúcar e preparado com aração e gradagem em porcentagem similar de argila e maiores concentrações de areia. A Ds_{máx} e Ug_{ót} obtida pelos mesmos autores foram

de 2,03 Mg m⁻³ e 0,13 kg kg⁻¹, enquanto que a densidade do solo foi de 1,70 Mg m⁻³. Segundo LINDSTRON & VOORHEES (1994), valores de densidade do solo relativa acima de 86% são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas e valores inferiores a 80% podem reduzir muito a capacidade de armazenamento de água, causada pelo aumento excessivo da macroporosidade em relação à de microporosidade.

Os sistemas de preparo apresentaram valores médios diferindo quanto à macro e microporosidade. Os valores médios de macroporosidade foram baixos em todos os sistemas de preparo e inferiores a 10%, o que é considerado limitante em muitos trabalhos (ERICKSON 1982, LANZANOVA et al. 2007, ROS et al. 1997, TORMENA et al. 2004). As comparações de médias mostram que a utilização do subsolador e da grade intermediária (St+Gn) na camada de 0,15 a 0,25 m afetou drasticamente a macroporosidade, com valor médio de 4,99%. Por outro lado, percebe-se que nas áreas menos perturbadas pelas hastes do subsolador, onde houve a mobilização parcial do solo, com a utilização da subsolagem somente na linha de plantio (Sl), os valores da macroporosidade foram de 7,14%. Os valores foram superiores nas operações de preparo que ocorreu menor número de passagem de equipamentos para o preparo de solo, associado à utilização da Gi e St com valores de 9,32 e 8,98%, respectivamente, sem preparo secundário.

Na camada 0,25 a 0,35 m, a Sl+Gn mostrou valor médio de macroporosidade muito reduzida, com apenas 3,68% de aeração. Estes resultados mostram que houve comprometimento da qualidade física do solo em determinado sistema de preparo, o que também pode ser observado pelo aumento da densidade do solo onde houve os menores valores de macroporosidade, comprovados por KAY & ANGERS (1999). No entanto, para precauções na escolha dos melhores indicadores físicos solo SCHIPPER & SPARLING (2000) observaram que a macroporosidade sofre muita variabilidade no solo, necessitam assim um grande número de amostras para representar 90% de confiabilidade. Assim, fica estabelecido que alguma influência com este relato nos resultados na macroporosidade, uma vez que os valores do coeficiente de variação foram elevados. Contudo, neste trabalho, os valores encontrados estão abaixo dos que já são considerados críticos. Estudo realizado por FERNANDES et al. (2012) mostraram macroporosidade reduzida em Latossolo Vermelho argiloso (680 g kg⁻¹) manejado com cana-de-açúcar com 11% nas mesmas camadas avaliadas neste estudo, porém os valores de microporosidade foram superiores a 40%.

A microporosidade foi menor na St e na Gi nas duas camadas avaliadas, assim como ocorreu com a macroporosidade. Para SILVA & RIBEIRO (1992), a microporosidade permaneceu sem alteração, porém houve aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade. A escarificação aumentou a microporosidade de 29 para 32% em cultivo de soqueira na cana-de-açúcar observado por PAULINO et al. (2004) em Latossolo Vermelho. A relação micro/macroporosidade obtida variou entre 2,03:1 para 6,41:1 em todos os preparos de solo. Em condições adequadas para o bom desenvolvimento das culturas é citados a relação de 2:1 (BAVER 1972, KIEHL 1979, LAL 1999, BRADY & WEIL 2002). A baixa macroporosidade e alta relação micro/macroporosidade indica falta de aeração no solo.

Já a porosidade total não foi diferente nos sistemas de preparo. Esse comportamento de baixa resposta, também foi observado por SILVA JUNIOR et al. (2010) trabalhando com diversos preparos convencionais e cultivo mínimo. Os mesmos autores encontram porosidade total variando de 46 a 51%, em solo

argiloso, superiores ao do presente estudo, que foi de 27 a 30%, resgatando o fato de ser um solo arenoso.

As modalidades de preparo de solo não refletiram significativamente sobre a resistência do solo à penetração (R_p e $R_{p_{cc}}$), porém diferiu entre camadas (Tabela 4). Em termos gerais, os valores mensurados com o controle da umidade ($R_{p_{cc}}$) foi menos sensível às variações do que a resistência do solo à penetração sem o controle da umidade (R_p) com medidas a campo. Tal afirmação pode ser comprovada pelos valores do coeficiente de variação para a $R_{p_{cc}}$ (22,69%) e R_p (39,68%). As maiores magnitudes ocorridas nos dados sem o controle da umidade é natural em condições de campo, pois as grandezas do solo variam em maior proporção nessas condições.

TABELA 4. Resistência do solo à penetração com controle de umidade ($R_{p_{cc}}$) e sem o controle de umidade (R_p) médios observados em Neossolo Quartzarênico órtico submetido a diferentes sistemas de preparo⁽¹⁾.

Sistema de Preparo ⁽²⁾	$R_{p_{cc}}$	R_p
MPa.....	
Camada (0,15 a 0,25 m).....	
<i>Sl+Gn</i>	2,58 aA	2,83 aB
<i>A+Gn</i>	3,12 aA	3,39 aA
<i>St+Gn</i>	3,12 aA	2,25 aB
<i>St</i>	2,53 aA	2,56 aB
<i>Gi</i>	3,35 aA	3,23 aA
Camada (0,25 a 0,35 m).....	
<i>Sl+Gn</i>	2,50 aA	3,54 aA
<i>A+Gn</i>	2,66 aA	3,41 aA
<i>St+Gn</i>	1,96 aB	3,27 aA
<i>St</i>	2,79 aA	3,80 aA
<i>Gi</i>	2,99 aA	3,29 aA
F (preparo)	1,85 ^{ns}	0,35 ^{ns}
F (camada)	2,70 ^{ns}	21,07 ^{**}
DMS (preparo)	1,25	39,68
DMS (camada)	0,99	14,83
CV (preparo)	22,69	39,68
CV (camada)	27,30	14,83

⁽¹⁾ Letras minúsculas referem-se à comparação de tratamentos numa mesma camada e maiúsculas comparam médias de camadas de um mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). ^{ns}, * e **: não significativo, significativo a 1 e 5%, respectivamente. ⁽²⁾ Sl+G: subsolagem na linha de plantio + gradagem pesada; A+Gn: arado aiveca + gradagem niveladora; St+Gi: subsolagem em área total + gradagem niveladora; St: subsolagem em área total, e; Gi: gradagem intermediária. DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação.

Os valores de $R_{p_{cc}}$ oscilaram entre 2,53 e 3,35 MPa, sendo menos e mais afetado pela St e Gi na camada de 0,15 a 0,25 m. O uso da A+Gn e da St+Gi resultou em uma $R_{p_{cc}}$ de 3,12 MPa e o uso da Sl+Gn apresentou valores de 2,58 MPa. Na camada de 0,25 a 0,35 m, os valores de $R_{p_{cc}}$ foram da ordem de 1,96 a 2,99 MPa, representado pelos preparos com utilização da St+Gn e Gi. A Sl+Gn, A+Gn e St ficaram com os valores intermediários de 2,50, 2,66 e 2,79 MPa, respectivamente. Os sistemas de preparo obedeceram à ordem crescente de valores de $St < Sl+Gn < A+Gn < St+Gi < Gi$ na camada de 0,15 a 0,25 m e $St+Gn < Sl+Gn < A+Gn < St < Gi$ na camada de 0,25 a 0,35 m. Pela ordem, pode-se verificar que St não foi tão eficiente na profundidade subsuperficial. Algumas pesquisas tem direcionado o pensamento sobre a subsolagem e seu efeito dependente da ação do clima (BUSSCHER et al. 2002, NICOLOSO et al. 2008, REICHERT et al. 2009). Para estes autores, a persistência do efeito do escarificação ou da subsolagem é dependente do volume e da intensidade da precipitação, pois, em anos mais chuvosos, o solo tende a se reconsolidar mais rapidamente. Os resultados desses estudos mostram dependência do volume acumulativo de chuvas.

O uso do penetrológ em agroecossistemas canavieiros nas melhores condições de umidade do solo para avaliar a compactação é adquirido com experiência prática. Dessa forma, a utilização deste equipamento se torna mais eficaz e rápido na obtenção dos dados, mesmo sem o controle da umidade no ponto de coleta. Sendo assim, os valores de Rp encontrado foram sensíveis nas diferentes camadas avaliadas.

As médias de Rp foram estatisticamente diferentes nas camadas avaliadas no preparo com Sl+Gn, St+Gn e St, com valores inferiores na camada de 0,15 a 0,25 m. Nessa camada, os preparos obedeceram a seguinte ordem decrescente: $A+Gn > Gi > Sl+nG > St > St+Gn$, com os valores de 3,39, 3,23, 2,83, 2,56 e 2,25 MPa, respectivamente. Na camada subsequente, a ordem decrescente foi: $St > Sl+Gn > A+Gn > Gi > St+Gn$, com os valores de 3,80, 3,54, 3,41, 3,29 e 3,27 MPa, respectivamente. Trabalho realizado por DIAS et al. (2001), testando diferentes sistemas de preparo de solo, não verificou diferenças nas propriedades físicas do solo, embora tenha observado maior resistência a penetração nas áreas onde o solo não foi revolvido.

A relação de limites restritivos estabelecidos por SILVA et al. (2002) de 2,0 MPa e os estabelecidos por BEUTLER & CENTURION (2004) de 2,38 MPa para solos de textura média estão todos abaixo do que foi apresentado pela $R_{p_{cc}}$ e Rp, com exceção apenas para St+Gn pelo penetrômetro de bancada na camada de 0,25 a 0,35 m. Estes valores considerados restritivos têm sido muito questionados, assim como a quantificação do indicador físico mais adequado, pois existe uma série de variáveis que afetam o crescimento e desenvolvimento das culturas. Para REICHERT et al. (2009), a resistência do solo à penetração é a propriedade que melhor caracteriza e diferencia os sistemas de manejo, camadas com diferentes graus de impedimento à penetração e o efeito da época de amostragem. Nas condições do trabalho, a $R_{p_{cc}}$ teve uma ótima relação com os valores de densidade do solo, o que mostra assiduidade dos dados na quantificação dos atributos físicos do solo (Figura 2). Essa relação é perfeitamente observada, pois as amostras utilizadas são as mesmas.

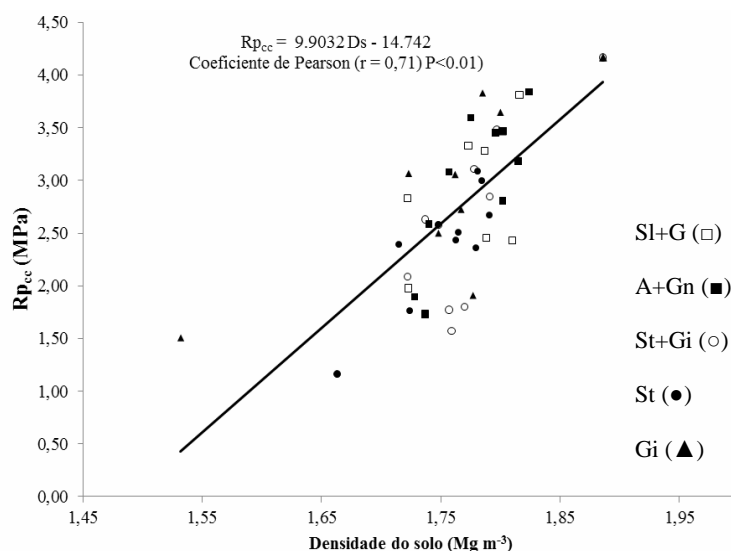


FIGURA 2. Relação entre resistência do solo à penetração (RP_{cc}) e a densidade do solo até a profundidade de 0,35 m, considerando todos os sistemas de preparo.

Os resultados aqui obtidos da resistência do solo à penetração possivelmente não foram influenciados pelas pequenas diferenças na composição granulométrica das áreas. Este fato por ser comprovado pelo trabalho de LIMA et al. (2013), os quais observaram proximidade dos valores da resistência do solo à penetração em solos cultivados com cana-de-açúcar com classes texturais diferentes.

O desempenho da produção agrícola (TCH) e industrial (TSH), foram significativamente influenciados pelos sistemas de preparo (Tabela 5). Os maiores benefícios para o TCH, ocorreram com uso da St+Gn e SI+Gn com respectivos 83,84 e 83,73 $Mg\ ha^{-1}$. O preparo de solo que mostrou a maior limitação na produção foi a Gi. Percebe-se assim, um decréscimo de 38,92 $Mg\ ha^{-1}$ de colmos e 6,02 $Mg\ ha^{-1}$ de açúcar em comparação ao melhor sistema de preparo. Estes resultados contrariam os estudos de PAULINO et al. (2004) por não terem verificado diferença na produtividade.

TABELA 5. Desempenho agrícola e industrial médios observados em Neossolo Quartzarênico órtico submetido a diferente sistemas de preparo⁽¹⁾.

Sistema de Preparo ⁽²⁾	TCH $Mg\ ha^{-1}$	TSH	TCH Relativo ...%...	Custo ⁽³⁾ ...R\$ ha^{-1} ...
SI+Gn	83,73 a	13,03 a	99,8	4.005,0
A+Gn	76,45 ab	12,35 ab	91,1	4.035,0
St+Gn	83,84 a	12,86 a	100,0	4.028,0
St	61,32 b	9,72 b	73,1	3.971,0
Gi	44,92 c	7,01 c	53,5	3.903,0
F	19,41**	14,43**	-	-
DMS	16,11	2,86	-	-
CV	12,05	13,68	-	-

⁽¹⁾ Letras comparam médias dos tratamentos pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). ns, * e **: não significativo, significativo a 1 e 5%, respectivamente. ⁽²⁾ SI+G: subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; A+Gn: arado aiveca + gradagem niveladora; St+Gn: subsolagem em área total + gradagem niveladora; St: subsolagem em área total, e; Gi: gradagem intermediária. ⁽³⁾ Em todos os sistemas estão incluídas as operações de dessecação, calagem, gessagem, fosfatagem e pré plantio incorporado (PPI). DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação.

Com relação aos atributos tecnológicos (Tabela 6), os valores não diferiram quanto à utilização dos preparos de solo. KUMAR et al. (2012) desenvolveram estudo com subsolagem em solos indianos e observaram que houve melhoria significativa na produtividade de cana-de-açúcar e na qualidade da matéria prima. Os mesmos autores também concluíram que a prática é benéfica para reduzir a compactação do solo, além de onerar menores custos em relação a outros sistemas de preparo. Neste trabalho não houve efeito significativo para os atributos tecnológicos açúcares totais recuperáveis (ATR), sacarose aparente (pol), pureza do caldo (PZA) e porcentagem de fibra.

TABELA 6. Atributos tecnológicos médios observados em Neossolo Quartzarênico órtico submetido a diferentes sistemas de preparo⁽¹⁾.

Sistema de Preparo ⁽¹⁾	POL ⁽²⁾	PZA	PC	Fibra (%)	ATR (kg Mg ⁻¹)
<i>Sl+G</i>	18,41	91,89	15,76	11,36	155,71
<i>A+Gn</i>	19,13	92,42	16,38	11,35	161,48
<i>St+Gi</i>	18,02	91,03	15,48	11,18	153,23
<i>St</i>	19,28	91,89	16,49	11,43	162,48
<i>Gi</i>	18,36	91,57	15,74	11,30	155,53
F	4,24 ^{ns}	1,82 ^{ns}	4,39 ^{ns}	2,78 ^{ns}	4,07 ^{ns}
DMS	1,49	3,16	1,32	0,59	12,13
CV	4,24	1,82	4,39	2,78	4,07

⁽¹⁾ Letras comparam médias dos tratamentos pelo teste de Tukey (P<0,05). ^{ns}, * e **: não significativo, significativo a 1 e 5%, respectivamente. ⁽²⁾ Sl+G: subsolagem na linha de plantio + gradagem niveladora; A+Gn: arado aiveca + gradagem niveladora; St+Gn: subsolagem em área total + gradagem niveladora; St: subsolagem em área total, e; Gi: gradagem intermediária. ⁽³⁾ DMS: diferença mínima significativa. CV: coeficiente de variação.

CONCLUSÕES

Na definição de sistemas de preparo de solo em áreas de reforma de canal, deve-se observar a otimização das operações que atendam as correções químicas e físicas do solo. Neste estudo foi discutido e apresentado como opções aplicáveis do ponto de vista físico e de produtividade da cana-de-açúcar, os tratamentos com combinações entre subsolagem na linha de plantio + grade niveladora; arado de aiveca + grade niveladora ou subsolagem em área total + grade niveladora, e ao contrário, não recomenda-se operações isoladas de grade ou subsolagem em área total.

REFERÊNCIAS

ANDRÉ, J. A. **Sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar em sucessão com amendoim**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2009. 19 p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia).

AZEVEDO, M.C.B. **Efeito de três sistemas de manejo físico do solo no enraizamento e na produção de cana-de-açúcar**. 2008. 100p. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A.; SILVA, A. R.; MUTTON, M. A.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de Cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 189-198, 2005.

CARVALHO, L. A.; SILVA JUNIOR, C. A.; NUNES, W. A. G. A.; MEURER, I.; SOUZA JÚNIOR, W. S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro Oeste do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, p. 199-211, 2011.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. S.; Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 940-949, 2011.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O. Processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n. 1, p.175-182, 1996.

DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A.; CAMPOS, M. S.; ANDRIOLI, I. Estudo agroeconômico de sistemas de preparo do solo em área de colheita mecanizada de cana crua. **STAB**, v. 19, n.8, p. 6-8, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio e Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.

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

KUMAR, S.; S. K. SAINI, S. K.; BHATNAGAR, A. Effect of subsoiling and preparatory tillage on sugar yield, juice quality and economics of sugarcane (saccharum species hybrid) in sugarcane plant-ratoon cropping system. **Sugar Tech**, v. 14, n. 4, p. 398-404, 2012.

LIMA, R. P.; LEÓN, JAVIER.; SILVA, A. R.; Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 016-020, 2013.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 9, p. 914-920, 2010.

PANKHURST, C.E.; MAGAREY, R.C.; STIRLING, G.R.; BLAIR, B.L.; BELL, M.J. GARSIDE, A.L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, v. 72, n. 2, p. 125-137, 2003.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C.; AZEVEDO, M. C. B.; SILVEIRA, K. R. P.; TREVISAN, A. A.; MURATA, I. M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 911-917, 2004.

SALVADOR, N.; BENEZ, S. H.; MION, R. L. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 256-262, 2008.

SCHIPPER, L. A.; SPARLING, G. P. Performance o soil condition indicators across taxonomic groups and land uses. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 300-311, 2000.

SILVA JUNIOR, C.A.; CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; LIBARDI, P. L.; SILVA, M. A. C.; OLIVEIRA, E. C. A. Alterações nos atributos físicos do solo relacionados a diferentes métodos de preparo no plantio da cana-de-açúcar. **Revista Agrarian**, v.3, n. 8, p.111-118 , 2010.

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, n. 2, p. 239-349, 2000.

SOUZA, H. A.; MARCELO, M. V.; CENTURION, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 4, p. 658-663, 2012.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 3, p. 271-278, 2005.

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. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010.

USDA - Department of Agriculture . **Soil quality test kit guide**. Washington: Soil Quality Institute, 1998. 82p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo. Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes temas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, 2007.