

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**NÍVEIS DE PALHIÇO E QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA
DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM
CANA-DE-AÇÚCAR**

DOUGLAS MARTINS PEREIRA PELLIN

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2017**

NÍVEIS DE PALHIÇO E QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

DOUGLAS MARTINS PEREIRA PELLIN
Engenheiro Agrônomo, MSc.

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO CARLOS TADEU VITORINO
Co-orientadora: Dra. CARLA ELOIZE CARDUCCI

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

P391n Pellin, Douglas Martins Pereira
NÍVEIS DE PALHIÇO E QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE UM
LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR /
Douglas Martins Pereira Pellin -- Dourados: UFGD, 2017.
72f. : il. ; 30 cm.

Orientador: ANTONIO CARLOS TADEU VITORINO
Co-orientador: CARLA ELOIZE CARDUCCI

Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias,
Universidade Federal da Grande Dourados.
Inclui bibliografia

1. Saccharum spp.. 2. intervalo hídrico ótimo. 3. capacidade de suporte de
carga. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

NÍVEIS DE PALHIÇO E QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICO DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

Por

Douglas Martins Pereira Pellin

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de DOUTOR EM AGRONOMIA

Aprovada em: 06/03/2017



Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino
Orientador – UFGD/FCA



Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez
UFGD/FCA



Prof. Dr. Munir Mauad
UFGD/FCA



Prof. Dr. Rafael Montanati
UNESP/FEIS



Prof. Dr. Eber Augusto Ferreira do Prado
UFGD/FCA

“Segura teu filho no colo. Sorria e abraça
teus pais enquanto estão aqui, que a vida
é trem-bala parceiro e a gente é só
passageiro prestes a partir”

Ana Vilela, 2016

Dedico este trabalho aos meus pais, Silvana Langhi Pellin Pereira e Edgar Martins Pereira, a minha futura esposa, Juliana Dorneles Pacheco, ao meu filho, João Lucas Dorneles Pacheco Pellin. Ao meu irmão Edgar Jr, aos meus sobrinhos, Eduardo, Rafaela e Nicoli, pois estes muito contribuíram apoiando-me e dando forças para esta conquista e nova jornada em minha vida.

Ao meu orientador Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino, por sempre cobrar, acreditar e apoiar para a realização e conclusão de mais uma etapa na minha vida profissional.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, que nos momentos difíceis e agonizantes, me abençoou e me deu calma, paciência, alegria, segurança paz e saúde.

A minha família, que esteve sempre presente quando precisei.

Ao orientador e amigo professor Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino, pelas constantes trocas de conhecimento e experiências.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Doutorado, e à Usina Monte Verde - Bunge, pelo apoio e oportunidade desta pesquisa.

A todos os professores da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, pelas valorosas informações tanto práticas quanto teóricas para realização deste trabalho.

Aos parceiros de pesquisa Eber Augusto Ferreira do Prado, Heverton Ponce Arantes, Bruno Agostini Colman, Rodrigo Otto, Diego Augusto, Bruna Neves Pereira da Silva, Antonio Higino Frederico Pereira, e Michele da Silva Gomes, pela contribuição na coleta e determinação de dados e elaboração dos dados, mas exclusivamente ao meu grande amigo Joel Victor Boeira Neves, que me ajudou em todas as etapas desse trabalho e veio a falecer em 2015.

A minha coorientadora Carla Eloize Carducci, pela gentileza em compartilhar seus conhecimentos e disposição para atender as dúvidas relacionadas ao trabalho.

Aos laboratórios de solos da UFGD e NutriSolo, pela análise química e física da área do experimento.

A minha esposa, Juliana Dorneles Pacheco, pelo apoio, confiança, amor e carinho nos momentos de agonia e alegria nessa etapa da vida.

Ao meu lindo e amado filho, João Lucas Dorneles Pacheco Pellin, por iluminar minha vida e me dar força para finalizar esse trabalho.

E a todos que não foram citados, mas que de alguma forma foram importantes para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

Lista de Quadros	ix
Lista de Figuras.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Aspectos econômicos da cultura da cana-de-açúcar.....	13
2.2 Aspectos botânicos, morfológicos e fisiológicos da cana-de-açúcar.....	14
2.3 Características da variedade de cana-de-açúcar RB 85 5536	17
2.4 Manejo do palhiço da cana-de-açúcar no solo.....	17
2.5 Tráfego de máquinas em cultivo de cana-de-açúcar.....	20
2.6 Qualidade física do solo.....	21
2.7 Interação dos rodados do conjunto colhedora, trator e transbordo com o solo .	23
2.8 Intervalo hídrico ótimo do solo	26
2.9 Capacidade de suporte de carga do solo	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Local, clima e solo	33
3.2 Instalação, condução e delineamento experimental.....	34
3.3 Análise estatística	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5 CONCLUSÕES	57
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE QUADROS

	PÁGINA
QUADRO 1. Análises química e granulométrica iniciais do solo da área experimental com cana-de-açúcar de 1º ano na profundidade de 0,10 e 0,30 m	33
QUADRO 2. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDS)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2), profundidade de 0,10 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo.....	41
QUADRO 3. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDS)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2), profundidade de 0,30 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo.....	42
QUADRO 4. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e DS^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na profundidade de 0,10 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo.....	43
QUADRO 5. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e DS^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na profundidade de 0,30 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo.....	44
QUADRO 6. Estimativas dos coeficientes “a” e “b” dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2) e número de amostras (n), coletadas em duas profundidades (0,10 e 0,30 m) de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo	50
QUADRO 7. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] de um Latossolo Vermelho distroférico, nas profundidades de 0,10 e 0,30 m, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo	51

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

FIGURA 1. Precipitações médias pluviométricas e temperatura média mensal na safra 2014	33
FIGURA 2. Disposição do experimento a campo com respectivos tratamentos. A: Vista da área experimental; B: Dimensionamento dos tratamentos e repetições; C e D: Retirada do palhiço e E: Pesagem e determinação de palhiço nas parcelas.....	35
FIGURA 3. Colhedora 3520 com 335cv de potência bruta e 17 Mg de massa.....	36
FIGURA 4. Transbordos, com massa de 8,0 Mg cada compartimento, distribuídos em quatro pneus de alta flutuação modelo 600/50-22,5 com pressão de inflação de 0,38 MPa, com capacidade para carregar até 10 Mg em cada compartimento com massa total do conjunto carregado de 46 Mg	36
FIGURA 5. Disposição dos anéis volumétricos centralizadas a 0,10 e 0,30 m de profundidade nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente	36
FIGURA 6. Coleta de solo nas parcelas após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar com posterior saturação dos anéis em laboratório. A: Marcação dos anéis com respectivos tratamentos; B: Disposição dos anéis nas duas profundidades; C: Retirada dos anéis com auxílio de um castelinho e D: Amostras saturadas.....	37
FIGURA 7. Processo de determinação da resistência do solo à penetração (RP) e pressão de preconsolidação após passagem pelas pressões estabelecidas. A: câmaras de Richards; B: penetrógrafo de bancada e C: consolidômetro	38
FIGURA 8. IHO, conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo a penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}), em função da densidade de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade de 0,30 m. “T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha ⁻¹ ; “T2” 10 Mg ha ⁻¹ ; “T3” 15 Mg ha ⁻¹ e “T4” 20 Mg ha ⁻¹	45
FIGURA 9. IHO, conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo a penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}), em função da densidade de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade de 0,30 m. “T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha ⁻¹ ; “T2” 10 Mg ha ⁻¹ ; “T3” 15 Mg ha ⁻¹ e “T4” 20 Mg ha ⁻¹	48
FIGURA 10. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a	

diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade de 0,10 m. T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹ 53

FIGURA 11. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade de 0,30 m. T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹ 54

RESUMO

O uso intensivo de máquinas na colheita da cana-de-açúcar onde ocorrem muitas vezes em teores de umidade inadequados atua diretamente na compactação do solo, conseqüentemente afetando os atributos físicos do solo. Objetivou-se avaliar a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes níveis de palhiço na superfície do solo, por meio do intervalo hídrico ótimo e da capacidade de suporte de carga. O estudo foi realizado na Usina Monte Verde – Bunge, Ponta Porã, MS, no ano agrícola 2013/2014, em um Latossolo Vermelho distroférico. O delineamento experimental foi em blocos, em esquema de faixas, com cinco tratamentos e cinco repetições. Foram avaliadas duas camadas, 0,20 e 0,40 m com anéis volumétricos coletados centralizados em 0,10 e 0,30 m, respectivamente. Os tratamentos foram os níveis de palhiço deixados sobre o solo: T0 = Sem palhiço; T1 = 5 Mg ha⁻¹; T2 = 10 Mg ha⁻¹; T3 = 15 Mg ha⁻¹ e T4 = 20 Mg ha⁻¹. Após a colheita mecanizada do segundo corte (setembro de 2014), foram retiradas amostras de solo com estrutura preservada em anéis volumétricos, nas profundidades de estudo. O tratamento sem adição de palhiço foi o que apresentou menor qualidade estrutural. Os tratamentos onde houve manutenção de palhiço na superfície do solo proporcionam as maiores amplitudes do intervalo hídrico ótimo e menores pressões de preconsolidação, apresentando melhores qualidades estruturais. A capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho distroférico foi a uma pressão de 430 kPa com umidade volumétrica de 0,29 m³ m⁻³ na profundidade 0,10 m e uma pressão de 310 kPa com umidade volumétrica de 0,32 m³ m⁻³ na profundidade 0,30 m nos tratamentos onde ocorreram adição de palhiço. A permanência de até 15 Mg ha⁻¹ seria o ideal para manutenção da qualidade estrutural do solo.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., intervalo hídrico ótimo, capacidade de suporte de carga, resistência do solo à penetração das raízes.

ABSTRACT

The intensive use of machines in sugarcane harvest where they occur frequently in inadequate moisture contents acts directly on soil compaction, consequently affecting the physical attributes of the soil. The objective of this study was to evaluate the structural quality of a Oxisol under different levels of soils at the soil surface, through, limiting water range and soil load bearing capability. The study was conducted in the Monte Verde - Bunge, Ponta Porã, MS, in the agricultural year 2013/2014, in Oxisol. The experimental design was in blocks, in a strips scheme, with five treatments and five replications. Two layers, 0,20 and 0,40 m were evaluated with volumetric rings collected centralized at 0,10 and 0,30 m, respectively. The straw levels left on the soil were: “T0” No-straw; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹. After the mechanized harvesting ratoon sugarcane 2^o cycle (September of 2014), soil samples were collected with structure preserved in metal cylinders, study depths. The treatment without addition of straw was the one that presented lower structural quality. The treatments where there was soil maintenance at the soil surface provide the greatest amplitudes of the least limiting water range and lower preconsolidation pressures, presenting better structural qualities. The load bearing capacity for the Oxisol was at a pressure of 430 kPa with volumetric humidity of 0,29 m³ m⁻³ in the depth 0,10 m and a pressure of 310 kPa with volumetric moisture of 0,32 m³ m⁻³ in the depth 0,30 m in the treatments where there was addition of straw. The permanence of up to 15 Mg ha⁻¹ would be ideal for maintaining the structural quality of the soil.

Key-words: *Saccharum* spp., least limiting water range, soil resistance to root penetration

1 INTRODUÇÃO

A expansão do setor sucroenergético para a região Centro-Oeste fez-se em função do custo de arrendamentos das terras mais viável e da topografia favorável, especialmente visando a colheita mecanizada, mantendo a sustentabilidade ambiental da cultura com ausência do fogo.

As principais áreas produtoras de cana-de-açúcar no Brasil já adotam o sistema de colheita mecanizada. Contudo, o tráfego de máquinas nos canaviais ao longo de sucessivos ciclos de cultivo, muitas vezes sem considerar umidade volumétrica do solo, tem contribuído para o processo de compactação.

Devido a utilização de máquinas e implementos com maior massa, torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias para mensurar a capacidade de suporte de carga do solo, tendo em vista o tráfego intenso de maquinário bem como o impacto destas práticas nos seus atributos físicos e mecânicos. Dentre esses atributos, destacam-se os componentes da porosidade relacionados com a retenção e o fluxo de água e ar no solo e o impedimento mecânico ao crescimento das raízes.

A capacidade do solo em resistir às cargas aplicadas é fundamental neste contexto, pois possibilita calcular a permeabilidade e definir regiões de maior ou menor susceptibilidade do solo a compactação pelo uso de máquinas em sistemas de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar (SOUZA et al., 2012). O conhecimento dos atributos físicos e mecânicos do solo têm sido utilizados para avaliar a susceptibilidade à compactação no momento adequado para executar as operações mecanizadas no campo.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um atributo do solo sensível aos efeitos da compactação do solo, sendo sugerido como indicador de qualidade física do solo que influencia diretamente no desenvolvimento e produtividade das culturas (KAISER et al., 2009; FIDALSKI et al., 2010; SOUZA et al., 2015; GARBIATE et al., 2016; VISCHI FILHO et al., 2016). O IHO do solo engloba informações sobre resistência à penetração das raízes (RP), disponibilidade de água e aeração do solo (SILVA et al., 1994; ROQUE et al., 2011), indicando assim as condições ideais ao desenvolvimento das culturas (SOUZA et al., 2015).

Outro fator importante para a qualidade estrutural do solo é a pressão de preconsolidação do solo, onde que é um indicador da máxima carga à qual o solo foi submetido no passado (DIAS JUNIOR, 2000; SILVA et al., 2010) e pode ser obtida a partir da curva de compressão do solo. A pressão de preconsolidação é considerada um

indicador da qualidade estrutural do solo (SEVERIANO et al., 2010) e é uma ferramenta capaz de identificar a real degradação nos solos (IORI et al., 2012).

A aplicação sobre o solo de pressões menores do que a pressão de preconsolidação causa deformações pseudoelásticas e recuperáveis, enquanto a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas e não recuperáveis, o que resulta na degradação da estrutura do solo (SEVERIANO et al., 2010; SOUZA et al., 2012; VISCHI FILHO et al., 2016).

Ao se colher a cana crua, as folhas secas e verdes dos colmos, pedaços estilhaçados de colmos, perfilhos mortos, ponteiros e colmos não transportados, além dos restos vegetais de plantas daninhas formam o chamado “palhiço”.

As vantagens obtidas com o palhiço como cobertura do solo foram relatadas por diversas pesquisas, entretanto, a quantidade mínima de palhiço que deve permanecer na superfície do solo ainda não foram definidas com exatidão para que promova benefícios na melhoria da qualidade do solo e da cultura são informações de extrema importância, uma vez que o volume excedente pode ser usado em outros setores como a cogeração de bioeletricidade e a produção de etanol de segunda geração, obtendo-se assim, a máxima eficiência na conversão de energia solar pela cana-de-açúcar.

Portanto, há uma preocupação em se determinar qual a quantidade mínima de palhiço que deve permanecer no campo, a fim de proporcionar maior produtividade da cultura, minimizando os efeitos negativos promovidos pelo impacto das máquinas pesadas utilizadas em todo o ciclo de produção da cana-de-açúcar.

Esse “colchão” de palhiço que permanece no solo ocasiona mudanças nos atributos químicos, físicos e biológicos do ambiente agrícola, tais como: aumento e estabilização da umidade gravimétrica (UG) (fator considerado muito importante principalmente em locais com déficit hídrico), aumento da rugosidade do solo, conseqüentemente aumento da infiltração de água, elevação dos teores de matéria orgânica, melhoria da fertilidade e controle da temperatura, maior eficiência no controle da erosão, menor incidência de luz na superfície do solo, irregularidade de brotação sobre o palhiço; queda da produtividade de variedades suscetíveis ao palhiço (GUIMARÃES et al., 2008).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a qualidade estrutural do Latossolo Vermelho distroférico submetido ao manejo de palhiço da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, após colheita mecanizada de cana crua tendo como indicadores o IHO e CSC.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos econômicos da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é originária do Sudeste Asiático, ilha de Nova Guiné, e foi descoberta por volta do século VI a.c., quando passou a ser utilizada como alimento e para construções. A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil pelos portugueses no início do século XVI com objetivo de produzir matéria prima para os engenhos de açúcar, na época, a primeira indústria instalada no Brasil. O colonizador português Martim Afonso de Souza foi quem iniciou a produção no ano de 1532, o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, em São Vicente-SP, onde construiu o primeiro engenho do Brasil, iniciando-se o ciclo da cana-de-açúcar, a primeira atividade econômica organizada no país (UNICA, 2014a).

O País moeu mais de 665 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2015/2016) com uma área destinada ao cultivo da cana de 8.654,8 milhões de hectares, segundo o 3º levantamento realizado pela CONAB (2016), se firmando como maior produtor de açúcar e etanol.

A estimativa de área de cana-de-açúcar colhida no Brasil destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2016/17 deverá ser de 9.110,9 milhões de hectares com uma produtividade média nacional que foi de 76.903 kg ha⁻¹. Já a produtividade média no Mato Grosso do Sul foi de 81,582 Mg ha⁻¹ acima da média nacional. Com um aumento esperado de 419,5 mil hectares, ou 4,8% em relação à safra 2015/16, se confirmada, será a maior área colhida no Brasil (CONAB, 2016).

Dos principais estados produtores do Centro-Sul do Brasil, São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, apenas os dois últimos indicam queda na produção total de cana-de-açúcar. Em Mato Grosso e Mato Grosso do Sul as variações climáticas, principalmente as chuvas inconstantes, prejudicaram o desenvolvimento do canavial nos estados e por isso há estimativa de queda para a safra 2016/2017 de 16,2% e 1,2% na produção nesses estados, respectivamente (CONAB, 2016).

A cadeia produtiva do setor sucoenergético (açúcar, etanol e energia) tem um produto interno bruto de US\$ 48 bilhões; são 430 unidades industriais produtoras que utilizam a matéria prima, cana-de-açúcar, produzida por 70 mil produtores. O setor

proporciona 1,2 milhão de empregos diretos e US\$ 15 bilhões obtidos com exportações (UNICA, 2014b).

O produto interno bruto (PIB) do setor em 2015 representou 2,2% do PIB brasileiro de R\$ 6,266 trilhões em 2016, revelando a importância dessa atividade para o Brasil (UDOP, 2016).

Além da produção de açúcar e etanol, nos últimos anos vem se destacando a utilização da biomassa da cana-de-açúcar, como o palhico e o bagaço, para a geração de etanol de segunda geração e energia elétrica. Isto está relacionado ao seu aspecto renovável e de baixo impacto ambiental da biomassa produzida, o que auxilia nas reduções das emissões de gases causadores do efeito estufa, assim como, a grande quantidade de biomassa existente na cultura, ainda pouco aproveitada (DEFILIPPI FILHO, 2013).

2.2 Aspectos botânicos, morfológicos e fisiológicos da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea, família das poáceas do gênero *Saccharum* que é nativo do sudeste da Ásia, no entanto, seu centro de origem é incerto. A espécie *Saccharum officinarum* tem origem na Nova Guiné e é a espécie base dos programas de melhoramento genético. Possui como característica alto teor de açúcares e baixa porcentagem de fibras, atributos importantes para a indústria, no entanto, com muitos problemas fitossanitários. Desse modo, hibridações interespecíficas e intervarietais foram realizadas para melhorar características como resistência as principais doenças, porte da parte aérea, ciclo e teor de açúcar (FIGUEIREDO et al., 2008).

Segundo Figueiredo et al. (2008), as variedades hoje utilizadas são todos híbridos melhorados e são chamados, na terminologia atual, de *Saccharum* spp. A quantidade de estudos com cana-de-açúcar não é proporcional a sua importância mundial em termos de alimentação e fonte de energia.

A cana-de-açúcar é uma planta com metabolismo do tipo C4 que tem como característica abundância de cloroplastos, fixação e refixação de CO₂, limite superior de temperatura superior a 45 °C e ausência de fotorrespiração. Fatores estes que proporcionam maiores taxas de crescimento, maior eficiência no uso da água e maior eficiência fotossintética. As folhas incorporam o carbono (C) atmosférico transformando-os em carboidratos de alto valor energético (CASAGRANDE & VASCONCELOS, 2008).

A cana-de-açúcar é uma planta que têm por característica o desenvolvimento em forma de touceira e ciclo semi-perene, em média 4 anos. Sua parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos, esses dois últimos importantes para o melhoramento genético e exercem influência negativa na produção comercial (SEGATO et al., 2006).

O florescimento, fenômeno indesejável à indústria, leva a perdas no teor de sacarose e variações na sua qualidade. O fenômeno pode levar à chamada isoporização, onde ocorre translocação do caldo em direção à panícula, reduzindo a eficiência de extração industrial da sacarose. Algumas variedades isoporizam mesmo sem florescimento sendo estas descartadas para o melhoramento (CASAGRANDE & VASCONCELOS, 2008).

O plantio da cana-de-açúcar é realizado de forma assexuada utilizando-se toletes (pedaços de colmo) que definem o número de gemas por metro linear, recomendado entre 12 a 14 gemas. Cada perfilho é uma planta independente e autônoma, com órgãos próprios e ligados entre si pela touceira onde podem competir nutrientes e água. O perfilhamento é influenciado por fatores ambientais (luz, temperatura, umidade do solo e nutrientes) e pelo manejo (espaçamento, profundidade de plantio, número e altura de corte, pragas e doenças). A extensão e a sobrevivência do perfilho tem caráter varietal e essa fase determina em grande parte a produtividade da cultura (SCAPARI & BEAUCLAIR, 2008).

Os colmos, de importância industrial, são formados externamente por células lignificadas que protegem os tecidos internos, feixes vasculares, a fibra da matéria prima, e células que armazenam o caldo. Os fatores que influenciam a quantidade de fibras são água disponível, nutrientes, temperatura, luz e área foliar (SCAPARI & BEAUCLAIR, 2008).

A parte subterrânea é formada por raízes e rizomas, com função de sustentação e absorção de água e nutrientes, do tipo fasciculada. Segundo Scapari & Beauclair (2008), a cana planta (cana-de-açúcar no primeiro corte) explora mais as camadas superficiais comparando se com a soqueira (cana-de-açúcar a partir do primeiro corte), que apresenta um incremento na exploração do solo em subsuperfície.

A cana planta apresenta menos raízes, mas sua eficiência de absorção é maior com raízes novas e tenras. Já a soqueira, com raízes mais velhas e lignificadas tem arquitetura que varia com a idade e o número de ciclos da cultura. Segundo Segato et al. (2006), 85% das raízes estão concentradas nos primeiros 0,50 m de profundidade do solo

e aproximadamente 60% entre os primeiros 0,20-0,40 m de profundidade, com pequenas variações dependendo do manejo e variedades utilizadas. Daí a importância de dar condições ideais de desenvolvimento para as raízes na região superficial do solo. A distribuição do sistema radicular depende das variações das condições químicas, físicas e biológicas do solo assim como da variabilidade dessas condições no tempo.

Com funções de sustentação, absorção e transporte, manutenção de reservas e defesa, a sua eficácia depende de mecanismos fisiológicos e refletem atributos da planta como tolerância à seca, capacidade de brotação e perfilhamento, porte, tolerância à mecanização, eficiência em absorver água e nutrientes, tolerância a pragas e doenças, fatores estes que por fim influenciam na produtividade final da cultura. O conhecimento da sua dinâmica de crescimento proporciona embasamento para aplicar técnicas de manejo para aperfeiçoar o potencial de produção da cultura (VASCONCELOS & CASAGRANDE, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, das condições físicas do solo, a densidade do solo (DS) é o atributo que mais interfere no desenvolvimento radicular e o aumento nos seus valores é devido à compactação resultante do tráfego de máquinas, veículos, implementos e animais (VASCONCELOS & CASAGRANDE, 2008).

Faroni e Trivelin (2006) destacaram que as raízes ativas da cana soca se concentram 31% de 0,6-0,8 m de profundidade e 23% de 0,0-0,20 m de profundidade no solo. Os fatores que mais influenciam o desenvolvimento radicular são os genéticos e as condições físico-químicas do solo.

Quando a DS aumenta, a macroporosidade é reduzida, assim diminuindo a aeração, a condutividade hidráulica e gasosa, promovendo aumento da resistência do solo à penetração das raízes (RP), interferindo direta e/ou indiretamente no desenvolvimento radicular (VASCONCELOS, 2003; MONTARARI et al., 2010; BERGAMIN et al., 2015; PELLIN et al., 2015; PEREIRA et al., 2015; GARBIATE et al., 2016; VISCHI FILHO et al., 2016).

A distribuição de raízes depende da umidade do solo e dos ciclos hídricos. Regiões ou períodos muito secos, influenciam no aprofundamento radicular, no entanto pouco adianta umidade volumétrica satisfatório se houver baixa aeração e alta RP, evidenciando que a porosidade e a RP influenciam no crescimento radicular, assim se a raiz tiver algum impedimento ao seu crescimento em profundidade a planta estará sujeita ao estresse hídrico nos períodos de seca (VASCONCELOS & CASAGRANDE, 2008; SOUZA et al., 2012; SOUZA et al., 2015; GARBIATE et al., 2016).

A textura do solo também influencia o desenvolvimento radicular em profundidade, por exemplo, em solos com textura média há um maior aprofundamento do sistema radicular que proporciona à planta uma maior tolerância à seca. Já para uma textura argilosa, nos períodos de seca há morte de raízes superficiais pelo ressecamento superficial do solo. No entanto a variação do desenvolvimento do sistema radicular em solos de classes e texturas diferentes está em função às suas características físicas (VASCONCELOS & CASAGRANDE, 2008).

2.3 Características da variedade de cana-de-açúcar RB 85 5536

A variedade RB 85 5536 destaca-se pelo alto teor de sacarose e produtividade em soqueira se adequando melhor em ambientes de produção B e C com época de colheita que contempla os meses de maio a setembro com uma maturação média dos talhões. O seu perfilhamento é intermediário e o fechamento das entrelinhas é bom, diminuindo a incidência de plantas daninhas. Possui um crescimento inicial vigoroso; não floresce, apresenta pouca isoporização; seu teor de fibra é médio; o tombamento é regular e a exigência em fertilidade do solo é alta; tem boa brotação de soqueira; apresenta sensibilidade média a herbicidas e resistência ao carvão, mosaico e ferrugem e é tolerante à escaldadura; não tem mostrado sintomas da síndrome do amarelecimento; apresenta suscetibilidade à broca (COOPERSUCAR UNIÃO, 2012).

2.4 Manejo do palhço da cana-de-açúcar no solo

O palhço, resíduo proveniente da colheita mecanizada, constituído por ponteiros, folhas, bainhas e alguns pedaços de colmo que são triturados pela colhedora e lançados sobre a superfície do solo formam uma excelente cobertura que protege o solo contra a erosividade das chuvas, fornecendo material orgânico que contribuirá para melhorar da qualidade estrutural do solo (SOUZA et al., 2005; SOUZA et al., 2016). A decomposição desse material aumenta os teores de matéria orgânica do solo a longo prazo e tem um efeito condicionador, pois, em função das suas características de estrutura orgânica, promove agregação das partículas, melhorando sua estrutura física (BRAIDA et al., 2010).

O palhço pode ser utilizado na cogeração de energia, uma vez que possui o dobro da eficiência energética que o bagaço oferece. Ambos poderão produzir o

equivalente a 15% da energia gerada no Brasil, até 2020. Além disso, pode ser empregada como matéria prima para a produção do bioetanol. Estima-se que sua utilização, juntamente com o bagaço, produziria aumento na produção de etanol da ordem de 40% (CEISE, 2011).

Avaliar o aproveitamento do palhiço para a geração de energia pode ser feito com base no custo e no balanço de energia, ou seja, a energia gerada por essa biomassa menos a energia consumida no processo. O palhiço fornece, em média, 13.551 MJ t^{-1} , sendo que no Brasil este material, se for recolhido e levado até as usinas, pode gerar energia suficiente para abastecer 10 milhões de pessoas por ano, enquanto que o bagaço, que já é amplamente utilizado para produção energética, pode atender, 55 milhões de pessoas (RIPOLI e RIPOLI, 2004; 2009).

Betancourt (1976), Aguillar et al. (1989), Ripoli et al. (1990) e COPERSUCAR (1998), concluíram que o palhiço varia entre 15 e 31% em peso úmido, em relação à quantidade de colmos industrializáveis dependendo das condições de campo (variedade, idade, número de corte e condições edafoclimáticas) e que seu poder calorífico útil é da ordem de $3.600 \text{ kcal kg}^{-1}$. O poder calorífico deste material é equivalente ao da madeira e superior ao do próprio bagaço da cana, o que o torna um material não mais descartável, mas um importante produto para agregação de valor para o setor sucroalcooleiro (RIPOLI, 1991; RIPOLI & RIPOLI, 2004; 2009).

Para muitas usinas, à viabilidade econômica para a instalação de novos projetos e também para o aumento da rentabilidade financeira ocorre com a geração de bioeletricidade, que se tornou um produto e fonte de receita adicional da industrialização da cana-de-açúcar. Desta forma, pode se tornar um fator limitante para a permanência de algumas unidades industriais na cadeia produtiva, a ausência de sistemas de cogeração, capazes de gerar e comercializar energia elétrica excedente à rede (DEFILIPPI FILHO, 2013).

Juntamente com a questão da viabilidade econômica andam as alterações na legislação ambiental que regulamentam a proibição do emprego do fogo para a despalha da cana-de-açúcar na pré-colheita, tornando cada vez menos usual esta técnica. Esse fato tem ajudado a acelerar o aumento da colheita mecanizada de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, a necessidade de manejo do palhiço remanescente no campo (SILVA, 2015).

A substituição da colheita manual pela mecanizada da cana é movido pelo aspecto econômico e acelerado por outros fatores, como a legislação e as pressões

populares. Ribeiro e Pesquero (2010) relatam que com a proibição da queima da cana para seu despalhamento pré-colheita tem-se alcançado contribuição à melhoria da qualidade do ar e a prevenção de doenças.

Portanto, ao se colher a cana-de-açúcar crua, o produtor canavieiro que erradicar a queima na colheita, deixará de emitir $0,286 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de material particulado (MP) e $13,53 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em CO_2 (PAULA et al., 2010). Somado a isso, o solo funciona como um compartimento sequestrador de carbono atmosférico (LUCA et al., 2008).

A deposição e a manutenção do palhicho sobre a superfície do solo é uma técnica de manejo que contribui para a conservação do solo, contudo, em relação às práticas agronômicas ainda pode ser a causa de alguns problemas relacionados ao manejo da cultura. Desta forma, faz-se necessário ter conhecimento aprofundado sobre os benefícios do palhicho no campo que permita decidir sobre a relação ideal entre palhicho no solo/palhicho removido, de forma a melhor contribuir com a sustentabilidade do setor (SILVA, 2015).

Segundo Silva et al. (2012), o total de material orgânico que pode ser retirado da superfície do solo é no máximo 50% do palhicho, sem prejuízos à cultura da cana-de-açúcar, e os 50% restantes são suficientes para melhorar a produção da cultura.

Conforme Costa et al. (2014), que estudaram os efeitos do manejo do palhicho e do nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar concluíram que a remoção total do palhicho reduz significativamente a produtividade de colmos, se comparado com a manutenção do palhicho no campo, e o aumento da adubação nitrogenada em até 180 kg ha^{-1} de ureia não compensaria o efeito da retirada do palhicho na queda da produtividade a longo prazo.

Muito se fala nas vantagens promovido pela permanência do palhicho no solo. Portanto, podem ser citadas dificuldades durante as operações de cultivo e adubação da soca (AUDE et al., 1993), baixa taxa líquida de mineralização de nitrogênio no período de um ano agrícola (TRIVELIN et al., 1996), dificuldade de execução de controle seletivo de plantas daninhas e aumento das populações de pragas que se abrigam e multiplicam sob o palhicho (MACEDO et al., 2003). Além disso, o grande volume de palhicho sobre a cana soca pode dificultar a sua emergência, causando falha na rebrota, especialmente nas variedades melhoradas que foram desenvolvidas num sistema de colheita com queima, que favorecia a maior taxa de emergência da cana soca (VASCONCELOS et al., 2003; VASCONCELOS & CASAGRANDE et al., 2008).

2.5 Tráfego de máquinas em cultivo de cana-de-açúcar

O tráfego de máquinas e equipamentos de forma intensiva em áreas de colheita de cana crua causam uma intensa degradação dos atributos físicos do solo, ocasionando a deterioração de sua estrutura provocando, assim, o processo de compactação do solo (IAIA et al., 2006; PEREIRA et al., 2015).

A compactação se agrava quando o solo é trabalhado com um conteúdo de água elevado, inadequado para as atividades agrícolas (SILVA e RIBEIRO, 1992; ROQUE et al., 2001; SILVA & CABEDA, 2006; CASTRO et al., 2013). No entanto, muitas vezes é inevitável realizar as operações de manejo com umidades inadequadas devido à inviabilidade econômica e operacional de suspender o fornecimento de matéria-prima à indústria por um teor de umidade mais adequado ao trânsito de máquinas.

Estudos de Hilbig et al. (2007), que avaliaram o tráfego de uma colhedora de grãos e de um trator, em um Latossolo Vermelho distrófico, com e sem a cobertura de palhico na superfície do solo, verificaram que a compactação do solo teve seus efeitos reduzidos pelo acúmulo de palhico, que absorveu parte da energia exercida pelas pressões aplicadas pelas máquinas agrícolas.

O tráfego realizado com a colhedora com e sem a presença de palhico sobre a superfície do solo obteve uma diferença significativa na da redução da pressão medida na profundidade de 0,12 e 0,42 m, mostrando que o palhico absorveu parte da energia aplicada (HILBIG et al., 2007). Os mesmos autores explicam que o fator para a redução da energia aplicada ao solo com a presença de palhico aumentou a área de contato pneu-solo, sendo de 1903 cm² no solo coberto com palhico e 1330 cm² quando não havia palhico na superfície.

Dentre os atributos físicos utilizados para avaliar a qualidade física do solo, a RP tem sido priorizada para avaliar sistemas de uso e manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (LIMA et al., 2006; MOLIN et al., 2012). Ainda, a RP apresenta maiores correlações com o crescimento radicular, destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular (LIMA et al., 2006) e como um indicador sensível à compactação do solo (TORMENA & ROLOFF, 1996).

A DS é um forte indicador da qualidade física (DIAS JÚNIOR, 2000). As causas naturais das alterações na DS são difíceis de serem definidas e avaliadas, agindo lentamente no solo, como por exemplo, a eluviação de argilas. As alterações antrópicas,

que são as forças mecânicas originadas da pressão causada pelos rodados das máquinas agrícolas e pela própria ação de implementos sobre o solo, são mais fáceis de serem avaliadas e atuam como indicadores da qualidade física do solo (SILVA et al., 1994; SOUZA et al., 2012).

Apesar dos atributos mecânicos permitirem uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos, vários são os trabalhos que quantificam os níveis de pressões que podem ser aplicados para evitar a compactação do solo (SILVA et al., 2001; SILVA et al., 2003; SILVA et al., 2010; SOUZA et al., 2012). Para a cultura de cana-de-açúcar com colheita mecanizada e manutenção do palhiço ainda são escassas estas informações.

A colheita mecanizada reduz o custo da colheita e supera a falta de mão-de-obra, mas gera outro problema: que é a compactação do solo. Essa modalidade de mecanização, é uma realidade nos canaviais do Mato Grosso do Sul e, já atinge mais de 97% da área cultivada com cana-de-açúcar nas áreas propícias à mecanização.

2.6 Qualidade física do solo

Qualidade física do solo pode ser definida como a capacidade do solo em promover ao sistema radicular das plantas condição favorável ao desenvolvimento. As condições favoráveis na zona radicular estão relacionadas com a estrutura do solo e são determinadas pela disponibilidade de água, aeração, temperatura e resistência que o solo oferece à penetração de raízes. No que diz respeito à funcionalidade, a estrutura do solo ideal é aquela que permite uma grande área de contato entre as raízes e o solo, apresentando espaço poroso suficiente para movimentação de água e difusão de gases, além da RP não ser impeditiva ao crescimento de raízes (VISCHI FILHO, 2014).

Estudando o valor crítico de porosidade de aeração, Cook e Knight (2003) concluíram que a porosidade de aeração, não pode ser relacionada a um valor crítico, como a taxa de difusão de oxigênio e mesmo a concentração de oxigênio. Os resultados mostram que é muito pouco provável que exista um atributo crítico universal relacionado com o arejamento do solo e a porosidade de aeração precisa ser medida.

Segundo Dexter (1988) normalmente a porosidade de aeração deve ser de pelo menos $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do volume do solo, na capacidade de campo, considerado requisito mínimo para o desenvolvimento da planta. Silva et al. (1994) avaliaram que a porosidade de aeração crítica de 10%, necessária para uma adequada difusão de oxigênio no solo, tem sido adotada como referência mínima para o desenvolvimento das raízes das plantas,

e não há resultados que indiquem valores mais consistentes, apesar de ser esta a variação que é tolerada entre diferentes espécies de plantas.

Estudos desenvolvidos por Kopi e Douglas (1991) associam as condições físicas ideais para o crescimento de plantas com uma porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o valor de 2,0 MPa como um limite de RP para o crescimento de raízes (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998) e parte aérea das plantas, além de uma ampla disponibilidade de água no solo, conteúdo de água compreendido entre 0,08 MPa, que é a capacidade de campo, e 1,5 MPa, que é o ponto de murcha permanente para solos de textura arenosa, ou 0,01 MPa, que é a capacidade de campo, e 1,5 MPa, ponto de murcha permanente para solos com textura argilosa.

Os pesquisadores Martino e Shaykewich (1994) avaliaram os efeitos de sistemas de preparo do solo nos atributos RP, DS e distribuição e tamanho dos poros, sob as culturas do trigo e cevada, nos sistemas de manejo, plantio direto e preparo convencional, em solos argilosos e solos com textura média, no Canadá.

A RP crítica à penetração das raízes foi determinada como sendo de 2,0 MPa, independente do tipo de solo, mas na maioria das situações as raízes foram capazes de crescer no solo com resistência mecânica acima de 2,0 MPa. Estudando a DS e porosidade de aeração, Silva et al. (1994) e Silva et al. (2012) inferiram que, com o aumento da DS, a porosidade de aeração diminui de forma progressiva e com o aumento na DS, ocorrem, simultaneamente, um aumento na RP e um decréscimo na porosidade de aeração.

Conforme Neves et al. (2003) que estudaram diferentes usos e manejos, incluindo culturas anuais, pomares e florestas naturais no estado do Paraná, em Latossolos argilosos, submetidos aos tratamentos: não compactado, compactado e em processo de compactação. As áreas com os solos compactados e em processo de compactação correspondeu aos valores de densidade de solo de 1,42 e 1,33 Mg m^{-3} , que foram significativamente maiores do que o valor de 1,18 Mg m^{-3} obtido para a DS em área não compactada. A porosidade total do solo compactado e em processo de compactação foi 0,49 e 0,52 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Esses valores foram menores do que o valor obtido para o solo não compactado de 0,60 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A compactação do solo destaca-se no mundo como um dos fatores que tem limitado a qualidade física de terras agrícolas e a obtenção de menores índices de produtividade (SILVA et al., 1994; SILVA et al., 2012; SOUZA et al., 2012; PELLIN et al., 2015). Dentre os atributos físicos utilizados para avaliar a qualidade física do solo, a RP tem sido atualmente priorizada para avaliar sistemas de uso e manejo, por ser um

atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (STONE et al., 2002; LIMA et al., 2006; MOLIN et al., 2012; CARVALHO et al., 2014).

Ainda, a RP apresenta maiores correlações com o crescimento radicular, destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular (LIMA et al., 2006) e como um indicador sensível à compactação do solo (TORMENA & ROLOFF, 1996). A DS é um forte indicador da qualidade física do solo (DIAS JÚNIOR, 2000).

Avaliações da qualidade física do solo podem ser feitas por meio de determinações indiretas que avaliam a quantidade de agregados estáveis em água (SILVA et al., 2000). Métodos que quantifiquem e qualifiquem as condições estruturais são importantes para avaliar a qualidade do solo.

Ceddia et al. (1999), estudando sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações de atributos físicos, observaram no sistema cana queimada a degradação dos atributos do solo evidenciada pela redução do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis e pelo aumento da DS.

A qualidade dos atributos físicos do solo quanto à sua estrutura pode ser melhorada pelo manejo e pela adição de material orgânico, simplesmente com a manutenção da palhço sobre o solo, após a colheita mecanizada (BRAIDA et al., 2010). Segundo Silva et al. (2000) devido à maior quantidade de biomassa e atividade biológica na superfície, proporcionados pela adoção do plantio direto, a estrutura de solos pode ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas do que em solos cultivados convencionalmente.

2.7 Interações dos rodados do conjunto colhedora, trator e transbordo com o solo

O conhecimento sobre as máquinas utilizadas na cultura da cana-de-açúcar e as interações entre os rodados das mesmas com os solos onde estão instalados os canaviais é importante para a preservação da estrutura física desses solos e para aumento da produtividade da cultura (VISCHI FILHO, 2014; SOUZA et al., 2015).

O setor sucroenergético tem a característica de utilizar máquinas e equipamentos pesados, que executam o cultivo intensivo do solo, o que resulta em degradação dos atributos físicos e conseqüentemente químicos do solo (SOUZA et al., 2006).

As novas tecnologias referentes às práticas de manejo mais adequado devem ser desenvolvidas e realizadas com objetivo de dimensionar, caracterizar e resolver os problemas de interação entre as máquinas e o solo, principalmente no que se refere à distribuição das pressões dos rodados no solo, evitando assim os efeitos negativos da compactação (VISCHI FILHO, 2014).

As diversas etapas da produção de cana-de-açúcar mostram a importância da utilização de tecnologias que são desenvolvidas conhecendo-se o maquinário agrícola disponível (SOUZA et al., 2012; CARVALHO et al., 2014).

O tráfego pesado das máquinas agrícolas nos solos durante o ciclo de produção da cana-de-açúcar pode causar a compactação do perfil do solo e por consequência alterar de forma negativa a infiltração de água e o bom desenvolvimento das raízes (SOUZA et al., 2012; CARVALHO et al., 2014; PELLIN et al., 2015). Segundo Severiano et al., (2010) a distribuição da pressão no solo causada pela compressão exercida pelos rodados pneumáticos dos tratores depende da carga suportada pelas máquinas, da área de contato solo-pneu, da distribuição da pressão na área de contato, umidade volumétrica e da DS.

O pneu é o responsável pela transformação da potência do motor em força de tração e consequente movimento do veículo. O pneu agrícola tem a função de proporcionar um bom desempenho atrativo e suportar as cargas radiais, de forma que as pressões exercidas no solo sejam as menores possíveis. Para uma mesma carga, um pneu estreito necessita de uma pressão interna maior que um pneu largo, pois em uma área de contato menor a pressão de contato é maior (BARBOSA, 2012).

A capacidade de carga do pneu, como fator importante para a distribuição da pressão no solo, é dependente das dimensões dos pneus, da pressão de inflação e do tipo do pneu (radial ou diagonal), de acordo com estudos de correlação entre as características dos rodados e os atributos do solo (VISCHI FILHO, 2014).

A mecanização agrícola teve um substancial aumento com a modernização da agricultura e o peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de tráfego também cresceram, e todo esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional da largura e do tamanho dos pneus resultando em alterações nos atributos físicos e estruturais do solo (STRECK et al., 2004). A ação e o desempenho operacional dos rodados pneumáticos de tratores agrícolas dependem de vários fatores, como o tipo de solo, suas condições físicas, tipo e geometria do pneu, cargas aplicadas aos rodados e sua pressão de inflação (VISCHI FILHO, 2014; PEREIRA et al., 2015).

O tráfego de máquinas em solo compactado, que se tornou rígido, proporciona maior deformação no pneu em relação ao solo mobilizado e friável; já no solo mobilizado o solo é que sofre a deformação, antes do pneu (SOUZA et al., 2006; SOUZA et al., 2010; SOUZA et al., 2012). Segundo Barbosa (2012), em solos muito compactados ou indeformáveis o fundo íncavo do pneu (região entre as garras) pode não tocar o solo, fazendo com que toda a carga seja distribuída somente na área de contato das garras, porém, em solos agrícolas, onde se verifica deformações do solo maiores, o fundo íncavo pode tocar o solo, aumentando a área de contato em relação ao solo indeformável.

Conforme Barbosa (2012), em superfícies de alta rigidez (solos compactados) a área de contato sobre a qual ocorre a distribuição da carga é a área efetiva, podendo reduzir a vida útil do pneu pelo desgaste excessivo das garras.

As baixas pressões de inflação ou altas cargas podem sobrecarregar os pneus, provocando grandes deformações em solos mobilizados e proporcionando áreas de contato maiores com formato similar a uma elipse, com a parte central tendendo para o formato de um retângulo (VISCHI FILHO, 2014). Estudos de Lyasko (1994) para determinar a área de contato do pneu com o solo representou esta ação assumindo uma área de contato retangular com bordas arredondadas, utilizando-se de um coeficiente de correção η que subtrai as bordas e obteve uma fórmula para estimar a área de contato da elipse que utiliza a medida do eixo maior e a dimensão do eixo menor da elipse circunscrita na área de contato.

É importante descrever a área de contato entre o pneu e o solo, pois é a partir desses dados que se obtém o valor da pressão no solo, onde é possível avaliar o impacto ambiental do tráfego de máquinas (VICH FILHO et al., 2016).

Conforme estudos de Hilbig et al. (2007), que avaliaram os efeitos do palhiço na relação rodado-solo, os resultados obtidos com o tráfego de um trator com palhiço cobrindo o solo e de uma colhedora de grãos, com palhiço, observaram que não houve diferença significativa entre os tratamentos, mesmo tendo a colhedora uma massa bem superior à do trator, o que foi explicado pelo fato da área de contato pneu-solo do trator ser de 920 cm², enquanto a da colhedora é de 1903 cm², indicando que quanto maior a área de contato pneu-solo menor a pressão aplicada sobre o solo. Os variados tipos de pneus e pressões de inflação se forem utilizados de forma inadequada contribuem negativamente para a maioria das operações agrícolas, induzindo à compactação do solo

e o aumento do consumo de combustível durante a execução do trabalho (MAZETTO et al., 2004).

Para que haja um bom desempenho trativo são empregados pneus de alta flutuação, que são divididos em duas categorias; pneus de alta flutuação de eixo trativo e pneus de eixo livre, sendo a diferença notada na banda de rodagem. Os pneus trativos possuem garras dispostas em ângulo para efetuarem o cisalhamento do solo e conseqüentemente transformarem o torque em força de tração. Os pneus de eixo livre não possuem garras, pois não são utilizados para tração (BARBOSA, 2012).

Conforme Vischi Filho et al. (2016) a pressão de inflação e o tamanho do pneu atuam na distribuição das forças sobre a área de contato com o solo e as forças de contato entre o solo e o pneu e a resistência do solo, na quantidade e na forma, indicam como as tensões dos pneumáticos no solo serão distribuídas.

O recalque consiste na profundidade de penetração do pneu na amostra de solo, devido às cargas radiais aplicadas sobre o mesmo pneu (MAZETTO et al., 2004). Pneus de mesma largura podem apresentar profundidades de recalque diferentes, se forem inflados com pressões diferentes, e as pressões de enchimento maiores resultam em profundidades de recalque maiores (McDONALD et al., 1995).

O uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas contribui para alterar os atributos físicos e dinâmicos dos solos e esse aspecto tem gerado o interesse dos pesquisadores para estudos de compactação e dinâmica do solo (SILVA et al., 2004). A compactação do solo pode ser minimizada com a utilização de baixa pressão nos pneus (HAKANSSON, 2005) ou com a utilização de máquinas sobre esteiras (ANSORGE; GODWIN, 2007).

Uma avaliação do maquinário de plantio e colheita da usina, com relação às áreas de contato rodado/solo é necessária para saber qual o tipo de máquina utilizar para cada atividade agrícola e em qual situação de umidade do solo é a mais adequada para receber essas máquinas e respectivos equipamentos (VISCHI FILHO, 2014).

2.8 Intervalo hídrico ótimo do solo

Na tentativa de integrar e simplificar o monitoramento da qualidade física do solo, Silva et al. (1994) propuseram o “Least Limiting Water Range” (LLWR) (LETEY, 1985) como um indicador da qualidade estrutural do solo para a produtividade das culturas. Esse indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração e RP num único

atributo, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas. A designação “Least Limiting Water Range” foi traduzida para o português e empregada como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) por Tormena et al. (1998).

O IHO é determinado a partir dos limites críticos para os seguintes indicadores de qualidade física do solo: conteúdo de água retido na capacidade de campo a 0,08 MPa para solos textura arenosa e 0,01 MPa para textura argilosa (θ_{CC}); conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente a 1,5 MPa (θ_{PMP}); porosidade de aeração mínima de 10% ou $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}); e conteúdo de água em que a RP atinge valores de 2,0 a 3,5 MPa, dependentes da cultura e sistema de manejo de solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 2007; BERGAMIN et al., 2015 e PEREIRA et al., 2015).

As condições ideais de umidade para o desenvolvimento do sistema radicular e conseqüentemente, crescimento das plantas ocorrem entre o limite superior e inferior do IHO. Segundo Silva e Kay (1997) os sistemas de manejo que permitem um IHO mais amplo terão menor probabilidade de redução da produtividade das plantas por deficiência hídrica. Ainda segundo os autores, o teor de carbono orgânico e a DS variam com as práticas de manejo e alteram o IHO conforme Silva e Kay (1996).

Quando a umidade volumétrica do solo fica acima ou abaixo dos limites de água disponível, as condições são críticas ao crescimento radicular das plantas devido as limitações nos atributos físicos do solo e, quando a DS estiver acima da densidade crítica, o IHO é nulo (SILVA & KAY, 1996).

Reduções na amplitude do IHO são ocasionadas pela degradação estrutural do solo (TORMENA et al., 2007; LIMA et al., 2012), produzindo condições que limitam o desenvolvimento da cultura, como é o caso da compactação do solo, a diminuição da porosidade total, que tem reflexos negativos na produtividade agrícola (KAISER et al., 2009; BLAINSKI et al., 2012).

Conforme Imhoff et al. (2001) o intervalo hídrico ótimo diminui com o aumento da DS e demonstra ser um indicador mais sensível que a água disponível para a detecção das alterações da qualidade física do solo. Um aumento do intervalo hídrico ótimo na camada superficial de um Argissolo Amarelo, ocasionado pelo manejo na cultura da cana-de-açúcar, foi observado por Pacheco e Cantalice (2011), indicando que um bom manejo da cultura melhora a qualidade estrutural dos solos.

Segundo Leão et al. (2004), à medida que o IHO se torna mais estreito aumenta a probabilidade de afetar o crescimento das plantas, pelo fato de o conteúdo de água no solo atingir valores inadequados à produção. Segundo Lapen et al. (2004),

quando a compactação atinge níveis excessivos, a aeração se torna deficiente sob elevados conteúdos de água e a RP pode restringir o crescimento das plantas com o secamento do solo.

Guimarães et al. (2013) estudaram o IHO em Latossolo Vermelho distrófico, verificaram que a porosidade de aeração não foi limitante para os solos avaliados e que a porosidade de aeração diminuiu com o aumento da DS e a densidade crítica foi maior ou igual a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$. Beutler e Centurion (2003) assumiram como limitante o índice de cone (IC) de 2,0 MPa e Tormena et al. (2007) considera IC de 3,5 MPa como limitante.

Estudando o controle de tráfego em Latossolo Vermelho distrófico sob cultivo da cana-de-açúcar, Roque et al. (2011) verificaram que os valores de RP aumentam com a DS, e para manter a RP de 2,0 MPa seria necessário um aumento da umidade volumétrica do solo. Para os três manejos estudados: piloto automático, controle de tráfego e testemunha, encontraram as densidades do solo críticas de 1,17, 1,18 e 1,11 Mg m^{-3} , respectivamente, e em todos os tratamentos, o intervalo hídrico ótimo teve a RP como limite inferior.

Araújo et al. (2013), estudaram sistemas de colheita e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob cana-de-açúcar e, observaram que, na área sob colheita mecanizada, a DS crítica, em que o IHO é nulo, foi de $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ e a média da DS encontrada na área de estudo foi de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$, na profundidade de 0,00-0,10 m e, de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, para as profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e nessas condições, a θ_{RP} encontrou-se acima do limite crítico relatado pela literatura, que é de 2,0 MPa. Nas duas áreas avaliadas, a RP foi o limite inferior do intervalo hídrico ótimo que teve como limites superiores a θ_{CC} e a porosidade de aeração θ_{PA} .

Estudando dois tipos de solo, Silva et al. (1994) encontraram valores de IHO variando de 0 a $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo hidromórfico siltoso, na DS (DS) de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ e $0,05$ a $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na DS de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ em solo textura média, ambos para a RP de 2,0 MPa. Avaliando o IHO em solos de clima temperado com diferentes classes texturais e condições de manejo Topp et al. (1994) e Silva e Kay (1997) concluíram que o IHO é negativamente correlacionado com o teor de argila e densidade dos solos e a amplitude do IHO vai depender da estrutura e textura do solo.

2.9 Capacidade de suporte de carga do solo

Imhoff et al. (2001) apontam a carência de estudos que relacionem indicadores de qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas e o indicador de capacidade de suporte do solo (σ_p). Tais autores apontam que a maioria dos estudos acerca do comportamento da estrutura dos solos agrícolas, em particular no Brasil, investigou a compactação das camadas do solo utilizando principalmente a DS e, algumas vezes, a RP. Em sua maioria esses estudos não são recentes e consideram as mais diversas variáveis, tratamentos e condições. Entretanto, verifica-se que quase todos se restringem a avaliar o fenômeno da compactação desconsiderando qualquer possibilidade preditiva (DIAS JÚNIOR, 2000).

Segundo Imhoff et al. (2001), que estudaram um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cana-de-açúcar, o IHO e a pressão de preconsolidação, reunidos, permitem definir um novo indicador que é a pressão crítica para o crescimento das plantas, que se mostra um indicador da pressão máxima que pode ser aplicada sem promover deterioração da qualidade física do solo. Para Horn et al. (1995) não é somente a pressão estática (tensão normal) que causa compactação, mas também forças dinâmicas causadas pelo patinamento e pela vibração do trator quando traciona os implementos.

Por outro lado, outros estudos buscam modelar o comportamento da estrutura do solo, visando à determinação de sua CSC para uma condição específica de manejo, que poderá ser usada para evitar a compactação adicional do solo para condições semelhantes (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA et al., 2001; ASSIS; LANÇAS, 2005; LIMA et al., 2006; SILVA et al., 2006; VASCONCELOS et al., 2012).

A pressão de preconsolidação é um indicador da máxima carga à qual o solo foi submetido no passado (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996) e pode ser obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona a DS ou o índice de vazios do solo com o logaritmo da pressão aplicada. A aplicação de pressões sobre o solo menores que a pressão de preconsolidação causa deformações pseudo-elásticas e recuperáveis, enquanto que a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas e não recuperáveis, resultando na degradação da estrutura do solo (DIAS JÚNIOR, 2000).

Solos com valores elevados de pressão de preconsolidação apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes (LIMA et al., 2006) e apresentam menor chance de sofrer alteração na sua estrutura com o tráfego.

Indicações na literatura científica em geral, ressaltam a importância de caracterizar o processo de compressão e de se obter o índice de compressão e a pressão de preconsolidação quando se trata de prevenir a degradação da qualidade física dos solos (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA et al., 2001; ASSIS & LANÇAS, 2005; LIMA et al., 2006; VASCONCELOS et al., 2012).

Em sistemas mecanizados, o conhecimento dos valores do índice de vazios, ou de densidade e dos indicadores resultantes da curva de compressão uniaxial a cada pressão exercida, pode apresentar grande relevância na adequação futura de máquinas que exerçam menores pressões sobre o solo e na redução do impacto causado na qualidade estrutural de terras agrícolas (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA et al., 2010).

Avaliando a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e um Cambissolo Háptico, Severiano et al. (2009) verificaram que o Latossolo Vermelho, mesmo apresentando maior CSC na profundidade de 0,10-0,15 m, em relação à camada superficial, devido ao incremento na DS, foi mais susceptível à compactação em todos os conteúdos de água no solo e profundidades avaliadas, o que foi influenciado pela sua estrutura granular, comparando-se com o Cambissolo que tem estrutura em blocos e por isso tem maior resistência à compactação.

Metodologias clássicas para avaliar o grau de compactação dos solos, como o ensaio de Proctor que mede a umidade volumétrica mais favorável à sua compactação, apesar da sua relativa simplicidade, tem efeito limitado para o estudo da compactação dos solos agrícolas, porque é realizado a partir de amostras deformadas, destruindo a estrutura do solo, a qual reflete a sua história do manejo (DIAS JÚNIOR, 2000).

Para avaliar a CSC utiliza-se modelos de compressibilidade com base na pressão de preconsolidação (σ_p), que predizem a máxima pressão que um solo pode suportar nas diferentes umidades sem causar compactação adicional (SILVA et al., 2001; SILVA et al., 2003a; SILVA et al., 2006; SILVA et al., 2010; SOUZA et al., 2012), permitindo estabelecer estratégia de prevenção da compactação do solo.

Kondo e Dias Júnior (1999) sugerem que a pressão de preconsolidação é considerada como um indicador da qualidade da sustentabilidade estrutural do solo. Segundo Hakansson e Voorhees (1997), é relativamente fácil verificar os efeitos da compactação nos atributos do solo, mas é difícil a determinação desses efeitos no crescimento das plantas por causa do grau de interação entre a dinâmica do meio ambiente e as características do solo.

De acordo com Oliveira et al. (2003) que estudaram um Latossolo Vermelho argiloso sob plantio direto, preparo convencional e vegetação natural de cerrado, as tensões de água e os sistemas de manejo influíram nas deformações do solo que se apresentaram mais elevadas nas tensões mais baixas em solo poroso, mostrando a necessidade de se ter um controle rigoroso da umidade do solo na tomada de decisão sobre a entrada de maquinários nas áreas de cultivo.

A pressão de preconsolidação é reduzida com o aumento do conteúdo de água no solo, passando esse solo a ter uma CSC menor com aumento da umidade volumétrica (SILVA et al., 2006). Estudos de Oliveira et al. (2003) inferiram que, independente do sistema de uso e manejo do solo, tensão de água e profundidade, os percentuais de redução do volume total de poros nas pressões de preconsolidação foram menores que 10%, demonstrando a importância da previsão do comportamento compressivo do solo para a realização de um manejo racional.

Conforme Severiano et al. (2010), que avaliaram os efeitos da colheita mecanizada da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háplico, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar realizada na zona de friabilidade do solo não provocou compactação prejudicial ao desenvolvimento da soqueira da cana e a operação de colheita mecanizada pode ser realizada quando os conteúdos de água estiverem até $0,16 \text{ kg kg}^{-1}$ em Latossolo Vermelho-Amarelo, e no Cambissolo Háplico deve estar abaixo de $0,21 \text{ kg kg}^{-1}$. No mesmo estudo, obtiveram resultados que mostram que os valores de pressão de preconsolidação crítica foram superiores aos valores de pressão de preconsolidação encontrados para os dois tipos de solos estudados, demonstrando que as operações de colheita não compactaram os solos.

A compactação de forma não recuperável ocorre quando a pressões de contato do rodado ou dos implementos ultrapassam a CSC. Portanto, devem-se quantificar as pressões de contato ou carregamentos que são aplicados no solo em seu manejo e concomitantemente quantificar a CSC do solo, por meio da pressão de preconsolidação em função do teor água no solo (SILVA et al., 2003b). O estudo de Porterfield e Carpenter (1986) aponta que o nível de compactação superficial depende da pressão de contato e a compactação profunda depende da área de contato, carga suportada e largura do pneu.

Segundo Novak et al. (1992) as pressões de contato pneu/solo elevadas ocasionam o aumento da DS e, para se evitar a compactação, é recomendado manter as pressões de contato baixas. De acordo com Kondo e Dias Júnior (1999), a compactação do solo pode ocorrer mesmo quando as operações agrícolas forem realizadas na zona de

friabilidade, caso seja aplicada a esse solo, pressões maiores do que a sua CSC. Conforme Carpenedo (1994), as pressões médias normalmente aplicadas sobre a superfície do solo pelos pneus de tratores e colhedoras estão entre 100 e 200 kPa, enquanto as carretas agrícolas podem exercer pressões com valores próximos de 600 kPa, dependendo da carga.

Existem várias técnicas capazes de minimizar os efeitos da compactação do solo, porém normalmente possuem custo elevado e raramente corrigem totalmente os efeitos da compactação. Nos canaviais as operações de preparo do solo convencionais foram substituídas por subsolagens cruzadas que são realizadas sem o devido cuidado com o teor de água desses solos no momento da operação, o que compromete o sucesso da mesma. É mais vantajoso evitar a compactação diminuindo o carregamento mecânico sobre o solo do que ter de realizar a descompactação periodicamente (HAKANSSON; REEDER, 1994).

O entendimento do comportamento compressivo do solo e das curvas de compressão adquire uma grande importância em razão de serem a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo mais adequado, reduzindo os efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação do solo (VISCHI FILHO, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, clima e solo

O estudo foi realizado a campo, durante o ano agrícola 2013/2014, na Usina Monte Verde – Bunge, localizada na latitude 22° 23’S e longitude 55° 08’W, município de Ponta Porã, Estado de Mato Grosso do Sul com altitude de 407 m. O trabalho foi desenvolvido num talhão de cana-de-açúcar cultivado no sistema de colheita mecanizada sem queima prévia (cana crua), em solo classificado como Latossolo Vermelho distroférico de textura muito argilosa (DONAGEMA et al., 2011) com topografia levemente ondulado e declive de no máximo 4% e apresentou as seguintes características na profundidade 0-0,20 e 0,20-0,40 m (QUADRO 1).

QUADRO 1. Análises química e granulométrica iniciais do solo da área experimental com cana-de-açúcar de 1º ano na profundidade de 0-0,20 e 0,20-0,40 m

Prof. (m)	pH* Ca Cl ₂	Ca	Mg	H+Al	K	P (Mehlich ⁻¹)	SB	CTC	V	M.O.	Argila	Silte	Areia
		cmol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³		%	g kg ⁻¹		
0,20	4,50	1,82	0,64	1,69	0,19	7,5	2,65	4,34	61,0	24,87	612	208	180
0,40	4,25	1,80	0,81	2,06	0,44	4,1	3,05	5,11	59,7	23,05	603	221	176

* Métodos Embrapa, 2013.

O clima da região é classificado como A_w, segundo classificação de Köppen, com precipitação média de 1400 mm por ano, com a temperatura média anual de 22 °C (ALVARES et al., 2013). Os dados climáticos do período experimental estão apresentados na Figura 1.

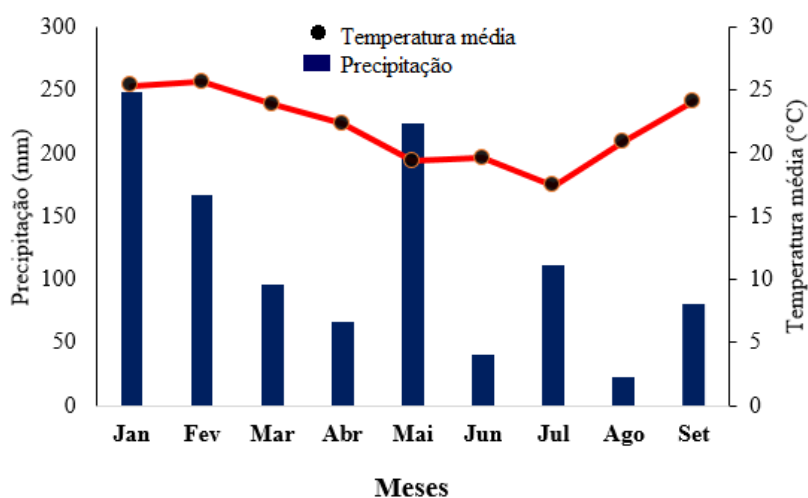


Figura 1. Precipitações pluviométrica e temperatura média mensal na safra 2014.

3.2 Instalação, condução e delineamento experimental

O preparo do solo para o plantio foi constituído por duas gradagens aradoras, uma subsolagem até 0,45 m de profundidade e uma gradagem niveladora. Em seguida aplicou-se a adubação de plantio, que consistiu na adição de 25 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia, 150 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl) e 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de superfosfato simples, calculados com base nos resultados da análise de solo.

O plantio do talhão foi realizado no dia 04 de fevereiro de 2013. Para o mesmo utilizaram-se dois colmos de cana (colmo-semente) do cultivar RB 85 5536, com um espaçamento entre linha de 1,50 m, onde foram distribuídos no sulco de plantio e posteriormente cortados, de modo que os toletes (rebolos) com três a quatro gemas permanecessem paralelos (pé com ponta), proporcionando a distribuição de 15 a 18 gemas viáveis por metro de sulco. Após 10 dias do corte da cana planta (novembro 2013), realizou-se a aplicação mecanizada de 140 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia e 110 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl) ao lado da linha de cana.

A implantação do experimento foi após a colheita da cana crua da variedade RB 85 5536, em dezembro de 2013, onde procedeu-se a disposição a campo dos tratamentos com os diferentes níveis de palhiço (com base na massa seca) 0, 5, 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹ de palhiço, T0, T1, T2, T3 e T4, respectivamente (Figura 2).

Após a colheita realizada no início do experimento, antes da aplicação dos tratamentos, amostras do palhiço da cana-de-açúcar foram encaminhadas ao laboratório de física do solo da UFGD para determinação do teor de água, deixando secar a 40°C até a amostra permanecer com peso constante, posteriormente foi determinada a quantidade de palhiço na área.

Em cada tratamento, foi retirado totalmente o palhiço (Figura 2 C e D), determinado sua massa por parcela e as quantidades relativas aos tratamentos foram recolocados nas entrelinhas de plantio (Figura 2 E). Após a instalação dos tratamentos, a área experimental recebeu os mesmos manejos das áreas comerciais da Usina. Controle de plantas daninhas por meio de aplicação de herbicidas e capina manual com um cultivador.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em faixas, com cinco tratamentos avaliados em duas camadas 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade e cinco repetições.



Figura 2. Disposição do experimento a campo com respectivos tratamentos. **A:** Vista da área experimental; **B:** Dimensionamento dos tratamentos e repetições; **C e D:** Retirada do palhiço e **E:** Pesagem e determinação de palhiço nas parcelas.

As parcelas para cada tratamento tinham 4,5 m de largura por 12 m de comprimento, totalizando 54 m², contendo 4 linhas cada. Todas as amostragens foram feitas unicamente na entrelinha central de cada parcela, estabelecendo-se as linhas periféricas como bordaduras (Figura 2).

Na segunda quinzena do mês de setembro de 2014, foi realizada a colheita mecanizada no talhão onde se encontrava o experimento com uma colhedora de cana-de-açúcar de modelo 3520, com 335cv de potência bruta e 17 Mg de massa, distribuídos em duas esteiras (Figura 3).

Um dos transbordos utilizados no experimento, deteve massa de 8,0 Mg distribuída em quatro pneus de alta flutuação modelo 600/50-22,5 com pressão de inflação de 0,38 MPa, com capacidade para carregar até 10 Mg de cana-de-açúcar, sendo utilizado dois transbordos acoplados ao trator com massa total do conjunto carregado de 46 Mg (Figura 4).



Figura 3. Colhedora 3520, com 335cv de potência bruta e 17 Mg de massa.



Figura 4. Transbordos, com massa de 8,0 Mg cada compartimento, distribuídos em quatro pneus de alta flutuação modelo 600/50-22,5 com pressão de inflação de 0,38 MPa, com capacidade para carregar até 10 Mg em cada compartimento com massa total do conjunto carregado de 46 Mg.

Após a colheita da cana crua, foram realizadas as coletas de solo com estrutura preservada em anéis volumétricos de 83 cm^3 , raio de 3,22 cm e 2,55 cm de altura, na entre linha de plantio centralizados em 0,10 e 0,30 m nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, respectivamente conforme Figura 5.

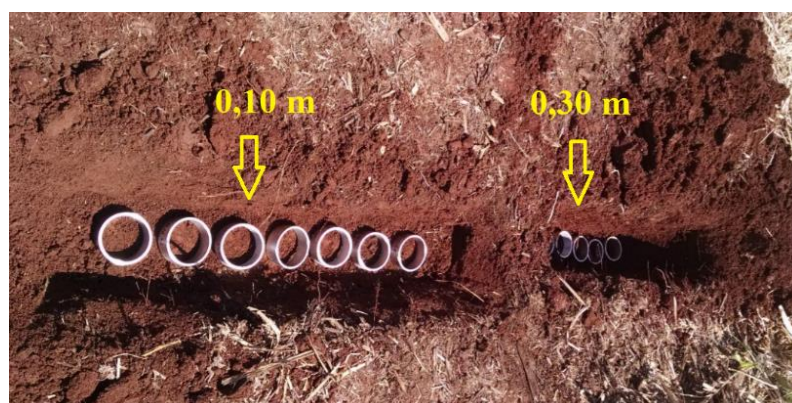


Figura 5. Disposição dos anéis volumétricos centralizadas a 0,10 e 0,30 m de profundidade nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Em cada parcela foram coletadas 7 amostras em cada profundidade avaliada, totalizando 70 amostras por tratamento (35 amostras em cada profundidade), num total de 350 amostras (Figura 6).



Figura 6. Coleta de solo nas parcelas após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar com posterior saturação dos anéis em laboratório. **A:** Marcação dos anéis com respectivos tratamentos; **B:** Disposição dos anéis nas duas profundidades; **C:** Retirada dos anéis com auxílio de um castelinho e **D:** Amostras saturadas.

Posteriormente as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) e submetidas à saturação por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingirem cerca de dois terços da altura do anel volumétrico para posterior estabilização do conteúdo de água (Figura 6 D).

As 35 amostras de cada tratamento (de cada camada) foram divididas em 7 grupos de 5 amostras, sendo cada grupo submetido aos seguintes potenciais matriciais: 0,006; 0,01; 0,033; 0,066; 0,1; 0,3 e 1,5 MPa, utilizando mesa de tensão (0,006 MPa) e câmara de Richards para os demais potenciais, conforme Prado (2015) (Figura 7 A).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio nos referidos potenciais, essas tiveram suas massas determinadas e logo em seguida encaminhadas para determinação da RP, utilizando um penetrógrafo eletrônico com velocidade constante de penetração de 1 cm min^{-1} , com diâmetro de base da haste de 4 mm e semiângulo de 30° (Figura 7 B). Os valores obtidos nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartados, visando eliminar o efeito da periferia da amostra (BRADFORD, 1986).

As frequências de leituras de RP foram obtidas a cada 0,25 s, obtendo-se 600 leituras por amostra, sendo utilizado o valor médio (Figura 7 B).

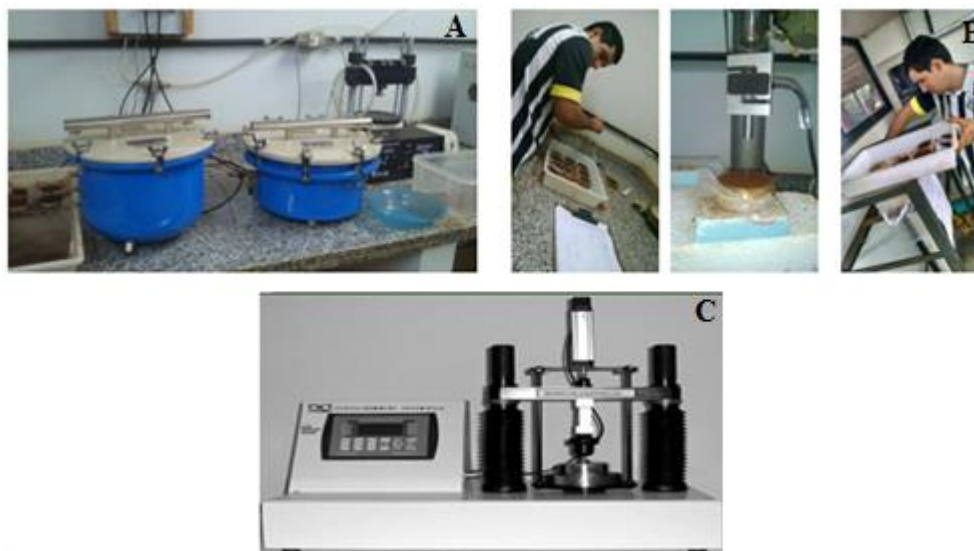


Figura 7. Processo de determinação da resistência do solo à penetração (RP) e pressão de preconsolidação após passagem pelas pressões estabelecidas. **A:** câmaras de Richards; **B:** penetrógrafo de bancada e **C:** consolidômetro.

O IHO foi determinado com base nos procedimentos descritos em Silva et al. (1994). Os valores críticos de umidade associados com o potencial matricial, RP e porosidade de aeração, representados, respectivamente, pelo teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}), potencial de 0,01 MPa (REICHARDT, 1988); pelo teor de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), potencial de 1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996); pelo teor de água volumétrica no solo em que a RP (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966); e pelo teor de água volumétrico em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE e SIEMER, 1968).

Para obter os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} , utilizou-se o modelo matemático do tipo $[\theta = \exp(a+bDS)\Psi^c]$, proposto por Silva et al. (1994), para ajuste dos dados originais, o qual incorpora a variável DS na função empregada por Ross et al. (1991), em que θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); DS é a densidade do solo (Mg m^{-3}); Ψ é o potencial matricial (MPa); e as letras “a”, “b” e “c” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

Os valores de RP de todas as amostras com θ e DS conhecidas foram ajustados matematicamente, utilizando o modelo do tipo $[RP = d\theta^e DS^f]$, proposto por Busscher (1990); θ é a UV ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); DS é a densidade do solo (Mg m^{-3}); e as letras “d”, “e” e “f” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo. Por meio dessa equação foi

possível determinar o valor crítico de θ para que a RP não ultrapassasse 2,0 MPa (θ_{RP}), em função da DS. Para isso, substitui-se RP na equação pelo valor de 2,0 MPa, considerado como limitante para efeito de cálculo do IHO.

O valor de θ_{PA} foi obtido aplicando o modelo do tipo [$\theta_{PA} = (1 - (DS/Dp)) - 0,10$], em que θ_{PA} é a umidade volumétrica do solo em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; DS é a densidade do solo (Mg m^{-3}); DP é a densidade de partículas (Mg m^{-3}), sendo adotado o valor de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ como média da densidade de partículas.

Na determinação dos limites superiores do IHO, considerou-se o θ_{CC} , ou aquele em que a θ_{PA} é considerada adequada ao crescimento e desenvolvimento da cultura. Como limites inferiores foram considerados o θ_{PMP} ou aquele correspondente à θ_{RP} limitante ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Após o cálculo dos limites superiores e inferiores do IHO, determinou-se a densidade crítica do solo (DSc), que é a DS em que o IHO se iguala a zero, ou seja, quando o limite superior do IHO equivale numericamente ao limite inferior (SILVA et al., 1994).

3.3 Análise estatística

Os ajustes dos modelos matemáticos e obtenção dos parâmetros “a”, “b”, “c”, “d”, “e” e “f”, foram realizados pelo método de regressão não linear.

Após a determinação da resistência à penetração, as amostras foram levadas para o consolidômetro automático, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, para o ensaio de compressão uniaxial de acordo com Bowles (1986) e modificado por Dias Junior (1994). As pressões crescentes aplicadas a cada amostra foram: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, sendo cada uma aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Taylor, 1966). Após cada ensaio de compressão uniaxial, as amostras foram levadas à estufa a 105-110 °C por 48 h, para determinar o conteúdo de água, a densidade e a macro e microporosidade do solo pelo método do anel volumétrico, conforme Donagema et al. (2011).

A curva de compressão do solo foi obtida utilizando-se o método não linear proposto por Dias Junior e Pierce (1996). Apesar da carência de aplicação do referido modelo em dados de pressão de preconsolidação em função da DS e UV, a sua utilização baseia-se na forte relação entre σ_p e RP indicando comportamento físico semelhante das duas variáveis (SEVERIANO et al., 2010).

A seguir, as capacidades de suporte de carga (σ_p) com os valores de conteúdo de água (θ) foram ajustadas uma regressão exponencial decrescente [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], proposto por Dias Junior (1994), determinando-se os modelos de CSC. As letras “a” e “b” representam os coeficientes empíricos de ajuste do modelo, ou seja, o coeficiente linear e angular, respectivamente.

As comparações entre os modelos foram feitas utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor e Cochran (1989). Para obtenção dos modelos lineares a partir do modelo exponencial [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], aplicou-se o logaritmo nos valores de pressão de preconsolidação, resultando em uma equação do tipo $\log \sigma_p = a + b\theta$. O teste de homogeneidade de modelos lineares considera dois modelos, e estes são comparados pela análise do intercepto “a”, do coeficiente angular “b” e homogeneidade dos dados (F).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no proposto por Grantz e Slinker (1990), Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012) é possível afirmar que os coeficientes do ajuste da curva de retenção de água do solo foram significativos para o tratamento T3 nas profundidades 0,10 e 0,30 m, pois o intervalo de confiança dos coeficientes não inclui o valor igual a zero, e não significativos para os demais coeficientes “b” dos tratamentos na profundidade 0,10 e 0,30 m (Quadro 2 e 3).

QUADRO 2. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDS)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2), profundidade de 0,10 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
		T0			T1	
a	-1,44162	-1,84662	-1,036625	-0,78396	-1,33268	-0,235226
b	0,20417	-0,06080	0,469140	-0,25812	-0,62730	0,111050
c	-0,05029	-0,06041	-0,040179	-0,04595	-0,06094	-0,030969
R²	0,91**			0,89**		
		T2			T3	
a	-0,96435	-1,55184	-0,376863	-0,57037	-0,78822	-0,352531
b	-0,08997	-0,49489	0,314950	-0,38463	-0,53647	-0,232794
c	-0,04447	-0,05667	-0,032260	-0,03527	-0,04259	-0,027955
R²	0,89**			0,95**		
		T4				
a	-0,15098	-0,51568	0,213726			
b	-0,69882	-0,95788	-0,439752			
c	-0,03693	-0,04528	-0,028574			
R²	0,97**					

θ : umidade volumétrica no solo ($m^3 m^{-3}$); DS: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Ψ : potencial de água no solo (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; T0” Sem palhiço; “T1” 5 $Mg ha^{-1}$; “T2” 10 $Mg ha^{-1}$; “T3” 15 $Mg ha^{-1}$ e “T4” 20 $Mg ha^{-1}$; ** significativo pelo teste “F” a 1%.

A curva de retenção de água no solo foi inversamente proporcional, diminuindo a retenção de água no solo com o aumento da DS, e diminuindo com o potencial total (Quadros 2 e 3) como também observado por Tormena et al. (1999);

Tormena et al. (2007); Serafim et al. (2008); Lima et al. (2012); Bergamin et al., (2015), Pereira et al., (2015) e Garbiate et al., (2016).

Os modelos ajustados para a RP em função da DS e conteúdo de água do solo, na profundidade 0,10 e 0,30 m, para todos os tratamentos explicam em média 92% da variabilidade dos dados, dando uma boa confiabilidade nos dados obtidos (Quadro 2 e 3).

QUADRO 3. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de retenção de água no solo [$\theta = \exp(a+bDS)\Psi^c$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2), profundidade de 0,30 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhicho no solo

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
		T1			T2	
a	-0,21986	-0,85368	0,413968	-1,28511	-2,32891	-0,241310
b	-0,62755	-1,04072	-0,214378	0,10252	-0,62090	0,825948
c	-0,02780	-0,04834	-0,007262	-0,06126	-0,09353	-0,028989
R²	0,86**			0,95**		
		T2			T3	
a	-1,20707	-1,91338	-0,500758	-0,83818	-1,17699	-0,499379
b	0,04979	-0,43660	0,536176	-0,26166	-0,49918	-0,024131
c	-0,05788	-0,07557	-0,040194	-0,05551	-0,06531	-0,045710
R²	0,89**			0,95**		
		T4				
a	-0,91493	-1,21531	-0,614538			
b	-0,16501	-0,38393	0,053917			
c	-0,04995	-0,05700	-0,042914			
R²	0,96**					

θ : umidade volumétrica no solo ($m^3 m^{-3}$); DS: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); Ψ : potencial de água no solo (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; T0” Sem palhicho; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹; ** significativo pelo teste “F” a 1%.

Para a profundidade 0,10 m, os intervalos dos coeficientes de determinação obtidos nos tratamentos foram em média de 0,89** a 0,97**, podendo ser explicados 89 a 97% da variabilidade dos dados encontrados (Quadro 2). Já na profundidade 0,30 m, a amplitude dos valores dos coeficientes de determinação obtidos nos 5 tratamentos foram de 0,86** a 0,96**, sendo semelhante a mesma amplitude da primeira profundidade avaliada, o que explicam 86 a 96% da variabilidade dos dados encontrados (Quadro 3).

Vischi Filho et al., (2016) avaliando o IHO em área de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de colheita mecanizada, no mesmo tipo de solo encontraram valores abaixo da amplitude do presente trabalho, variando de 78 a 88%. Os valores obtidos no

presente trabalho demonstram uma melhor precisão amostral e maior confiabilidade nos dados encontrados.

QUADRO 4. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e DS^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na profundidade de 0,10 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhicho no solo

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
		T0			T1	
d	0,08338	0,03319	0,133578	0,12471	0,04034	0,209082
e	-1,48384	-2,09336	-0,874328	-1,63127	-2,45844	-0,804093
f	3,84572	2,89653	4,794909	1,96414	-0,26554	4,193810
R²	0,91**			0,80**		
		T2			T3	
d	0,06597	0,01565	0,116289	0,10232	0,03277	0,171861
e	-2,74908	-3,80683	-1,691335	-2,11814	-3,00914	-1,227136
f	0,81816	-1,78618	3,422495	1,17454	-0,27094	2,620013
R²	0,83**			0,85**		
		T4				
d	0,02470	0,00678	0,042631			
e	-3,56546	-4,39982	-2,731092			
f	0,21405	-1,36755	1,795641			
R²	0,89**					

θ : umidade volumétrica no solo ($m^{-3} m^{-3}$); DS: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração das raízes (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; T0” Sem palhicho; “T1” 5 $Mg ha^{-1}$; “T2” 10 $Mg ha^{-1}$; “T3” 15 $Mg ha^{-1}$ e “T4” 20 $Mg ha^{-1}$; ** significativo pelo teste “F” a 1%.

Os ajustes da curva de RP dos valores obtidos na profundidade 0,10, evidenciaram que os coeficientes ‘d’ ‘e’ e ‘f’ foram significativos a 1% em T0, pois seus intervalos de confiança não incluíram o valor zero, como proposto por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012), exceto para o coeficiente “f” nos demais tratamentos.

Já para a profundidade 0,30 m, T1, T2 e T4 o intervalo de confiança dos coeficientes do ajuste da curva de RP não incluiu valor igual a zero, possibilitando afirmar que estes foram significativos (Quadro 4 e 5), possibilitando afirmar que os diferentes níveis de palhicho inferiram nos atributos físicos do solo na profundidade subsuperficial de 0,30 m. Resultados semelhantes foi observado por Prado (2015) ao trabalhar com

culturas alternativas para renovação de canavial em um Latossolo Vermelho distroférico semelhante ao do presente estudo.

QUADRO 5. Estimativas dos coeficientes de regressão para a curva de resistência do solo à penetração ($RP = d\theta^e DS^f$), com respectivos coeficientes de determinação (R^2), na profundidade de 0,30 m de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo

Coeficientes	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança	
		Li	Ls		Li	Ls
		T0			T1	
d	0,04278	-0,00410	0,089664	0,05933	0,03103	0,087629
e	-2,86055	-4,41221	-1,308899	-2,65291	-3,13133	-2,174495
f	1,62648	-2,05028	5,303236	1,64108	0,56866	2,713495
R ²	0,79**			0,94**		
		T2			T3	
d	0,04610	0,01443	0,077762	0,06060	0,01836	0,102834
e	-1,74706	-2,52192	-0,972196	-2,77460	-3,54838	-2,000817
f	5,40219	2,65032	8,154066	0,78264	-1,02031	2,585582
R ²	0,91**			0,88**		
		T4				
d	0,05615	0,02063	0,091675			
e	-1,87432	-2,78735	-0,961284			
f	4,24080	0,89437	7,587225			
R ²	0,90**					

θ : umidade volumétrica no solo ($m^3 m^{-3}$); DS: densidade do solo ($Mg m^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração das raízes (MPa); Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95%, respectivamente; T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹; ** significativo pelo teste “F” a 1%.

O decréscimo da umidade volumétrica do solo e aumento da RP e DS pode estar associado à maior coesão entre as partículas minerais, ou seja, por adsorção entre partículas de mesma natureza por ligação eletrostática entre superfícies, principalmente em solos com textura argilosa (BLAINSKI et al., 2009), enquanto a redução da RP com o aumento umidade volumétrica do solo (θ) deve-se a redução da coesão entre as partículas, devido ao efeito lubrificante da água (BLAINSKI et al., 2012). Resultados semelhantes ao deste trabalho sobre a curva de resistência a penetração foram descritos por Sila et al. (1994), Pereira et al. (2015), Souza et al. (2015), Garbiate et al. (2016) e Vischi Filho et al. (2016).

As variações das tensões matriciais, os limites críticos correspondentes à capacidade de campo (0,01 MPa), representado pelo ponto de murcha permanente (1,5

MPa), à porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a RP das raízes de 2,0 MPa, para cada valor de DS estão apresentadas na Figura 8.

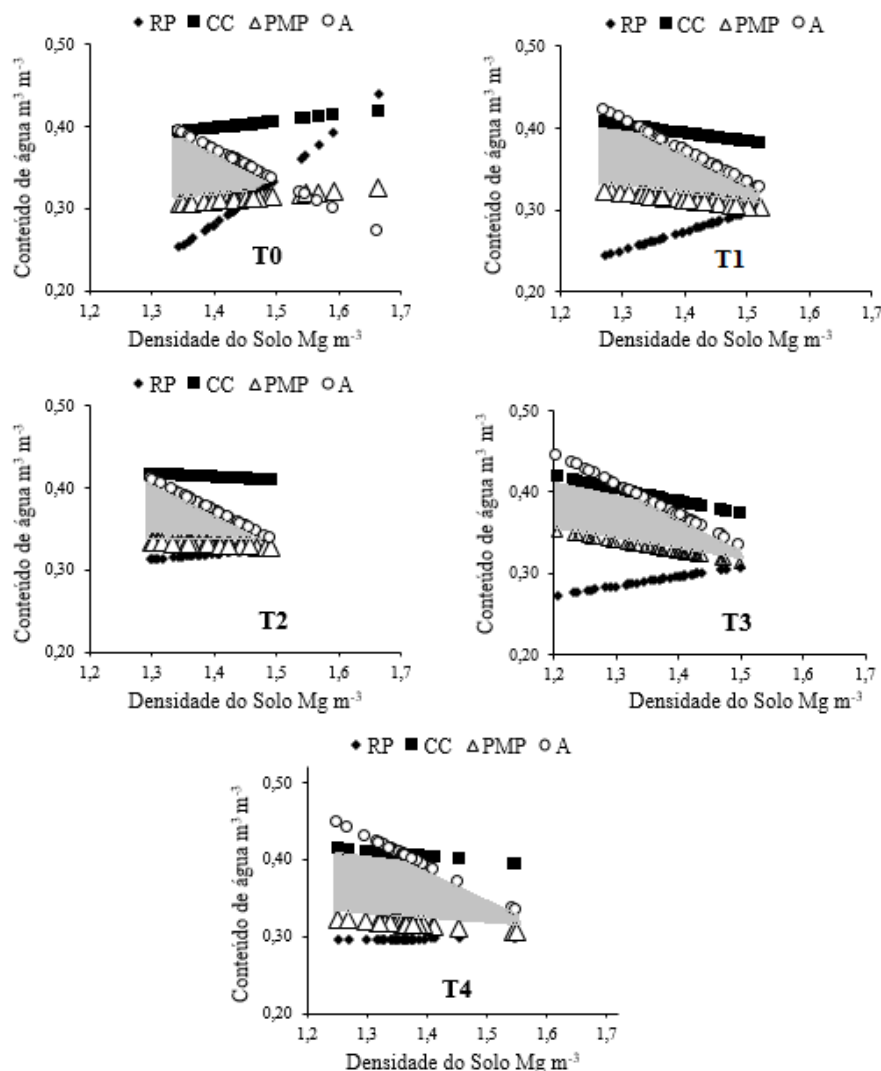


Figura 8. IHO, conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo a penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}), em função da densidade de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade 0,10 m. “T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha^{-1} ; “T2” 10 Mg ha^{-1} ; “T3” 15 Mg ha^{-1} e “T4” 20 Mg ha^{-1} .

A densidade crítica do solo (DSc), que corresponde à DS onde o IHO é igual a zero (Silva et al., 1994) é definida pela interseção das equações que determinam os limites inferiores e superiores do IHO. Nesse caso, a DSc foi definida pela interseção da θ_{PA} e θ_{RP} em T0 para profundidade de 0,10 m. Já para T1, T2, T3 e T4 a DSc foi definida pela interseção da θ_A e θ_{PMP} .

Constatou-se aumento no IHO conforme o aumento da DS foi até a θ_{RP} substituir a θ_{PMP} ou a θ_{PA} substituir a θ_{CC} . Neste ponto, depara-se com o maior valor de água disponível. Neste contexto, o aumento da DS até certo limite é favorável em termos de retenção de água, como também descrito por Leão et al. (2006) e Severiano et al. (2011). Bergamin e al., (2015), Pereira et al. (2015), Prado (2015) e Garbiate et al., (2016), encontraram resultados semelhantes ao trabalharem com Latossolo Vermelho distroférico, argiloso com diferentes tipos de manejos, sendo este comportamento uma característica deste solo.

A estrutura granular pequena ou muito pequena, típica desse solo, favorece a formação de uma maior microporosidade dentro dos grânulos que retêm água em tensões muito elevadas e macroporos entre os grânulos que perdem água facilmente por ação da gravidade (PRADO, 2015).

Nesse contexto, uma pequena compactação, refletida pelo aumento da DS pode refletir em uma distribuição de poros mais adequada para o aumento da disponibilidade para T1, T3 e T4 de água no solo. Tal fato pode ser comprovado ao se verificar a importância que a porosidade de aeração adquire com o aumento da DS (Figuras 8 e 9).

Os tratamentos T0 e T2 que têm como limite superior a umidade volumétrica na capacidade de campo, até em torno da DS de 1,34 e 1,30 $Mg\ m^{-3}$, respectivamente, e apresentam um grau de compactação que reduz a qualidade estrutural quando o limite superior passa a ser a porosidade de aeração a porosidade de aeração, para a profundidade 0,10 m (Figura 8). Estes resultados estão de acordo com Garcia (2010), que teve como limite superior umidade volumétrica na capacidade de campo em toda a faixa de DS, ao avaliar a ação de espécies de cobertura, gramíneas e uma leguminosa, em rotação com a soja, nos atributos físicos de um Latossolo em semeadura direta, ao longo de três anos.

Já para Lima et al. (2012), Araújo et al. (2013), Pereira et al. (2015), Prado (2015) e Vischi Filho et al. (2016) obtiveram como limite superior do IHO no mesmo tipo de solo, a capacidade de campo de até a DS de 1,40 $Mg\ m^{-3}$ e, após isso, obteve como limite superior a porosidade de aeração.

Segundo Kaiser et al. (2009), quando o intervalo hídrico ótimo passa a ser reduzido em seu limite superior pelo conteúdo de água na porosidade de aeração, indica que os macroporos foram modificados por processos compressivos. Sendo que sua diminuição pode limitar as trocas gasosas do solo, já que uma das suas principais funções é a aeração do solo, o que pode prejudicar o crescimento das plantas. Conforme Leão et

al. (2004), à medida que o IHO se torna mais estreito aumenta a probabilidade de afetar o crescimento das plantas, pelo fato de o conteúdo de água no solo atingir valores inadequados à produção.

Em relação ao limite inferior, os tratamentos T1, T2, T3 e T4, foram limitados pelo ponto de murcha permanente na profundidade 0,10 m, o que mostra a eficiência da permanência do palhicho da cana-de-açúcar pós colheitas mecanizada para a redução da RP (Figura 8). Os tratamentos T3 e T4 não atingiram DSc igual a zero Silva et al. (1994), sendo esses, os que apresentaram melhores amplitudes de IHO, de 1,20 a 1,55 Mg m⁻³. Valores de amplitudes semelhantes foi obtido por Prado (2015), quando se utilizou *Crotalaria juncea* e soja como alternativas de renovação de canavial.

As variações das tensões matriciais dos limites críticos correspondentes à capacidade de campo (0,01 Mpa), ponto de murcha permanente (1,5 Mpa), porosidade de aeração 0,10 m³ m⁻³ e à RP de 2,0 MPa, para cada valor de DS, nos tratamentos avaliados na profundidade 0,30 m, são apresentadas na (Figura 9).

Constatou-se também aumento do IHO com o de DS até a θ_{RP} substituir a θ_{PMP} ou a θ_{PA} substituir a θ_{CC} . Neste ponto, depara-se com o maior valor de água disponível. A densidade crítica do solo (DSc), foi definida pela interseção da θ_{PA} e θ_{RP} em T0, T1, T2. Para os demais tratamentos na profundidade 0,30 m não atingiram valores de DSc. Os limites superiores da profundidade 0,30 m apresentaram resultados diferentes aos da profundidade 0,10 m, onde o limite superior do IHO foi a capacidade de campo até 1,35 Mg m⁻³.

Ao se verificar o IHO do solo em T3 e T4 para a profundidade 0,30 m (Figura 9), nota-se maior intervalo de umidade até a DSc de 1,51 e 1,55 Mg m⁻³, respectivamente quando comparado aos demais tratamentos, pois a maior permanência de palhicho, há maior dissipação da energia aplicada pelas pressões dos rodados do conjunto colhedora, trator e transbordo. Resultado semelhante foi obtido em T1, mas a porosidade de aeração começou a limitar o IHO quando substituiu a capacidade de campo na DS 1,33 Mg m⁻³ e a resistência do solo a penetração foi limitante em todo aumento da DS, o que não ocorreu em T3 e T4. Resultado semelhante foi observado por Prado (2015) para o mesmo tipo de solo quando usou na renovação de canavial *Crotalaria juncea*.

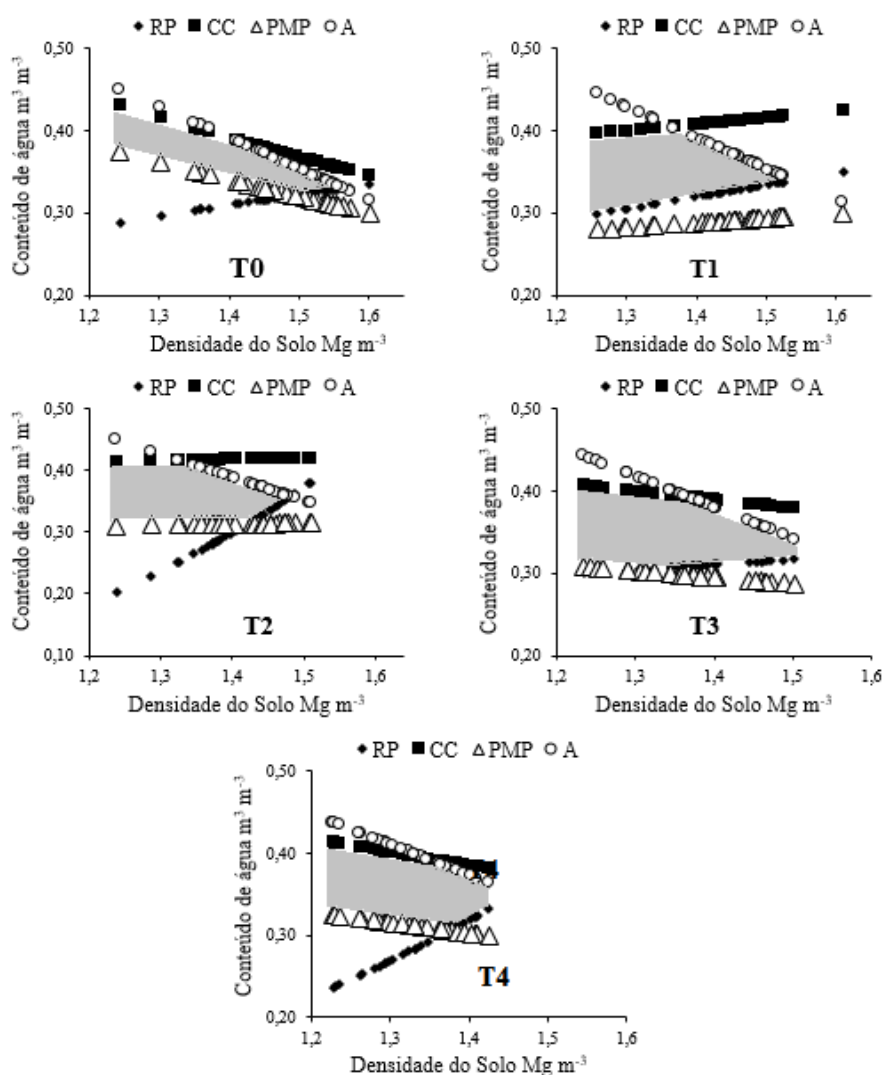


Figura 9. IHO, conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e resistência do solo a penetração de $2,0 \text{ MPa}$ (θ_{RP}), em função da densidade de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhicho no solo, na profundidade de $0,30 \text{ m}$. “T0” Sem palhicho; “T1” 5 Mg ha^{-1} ; “T2” 10 Mg ha^{-1} ; “T3” 15 Mg ha^{-1} e “T4” 20 Mg ha^{-1} .

Todos os cinco tratamentos tiveram como limite superior a porosidade de aeração, onde substituiu a umidade volumétrica na capacidade de campo até em torno da DS de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$, quando o limite passa a ser umidade volumétrica na capacidade de campo, para a profundidade $0,30 \text{ m}$ (Figura 9). Estes resultados estão de acordo com Blainsk et al. (2009) Lima et al. (2012), Araújo et al. (2013), Pereira et al. (2015), Prado (2015) e Vischi Filho et al. (2016), que obteve como limite superior do IHO no mesmo tipo de solo, a capacidade de campo em torno de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ de DS e após isso obteve como limite superior umidade volumétrica na porosidade de aeração. Resultados estes

que diferem dos relatados por Garcia (2010), que teve como limite superior umidade volumétrica na capacidade de campo em toda a faixa de densidade, ao avaliar a ação de espécies de cobertura, gramíneas e uma leguminosa, em rotação com a soja, nos atributos físicos de um Latossolo em semeadura direta, ao longo de três anos.

Em relação ao limite inferior, os tratamentos T2, T3 e T4 foram limitados pelo ponto de murcha permanente na profundidade 0,30 m até a DS 1,36 Mg m⁻³, o mesmo ocorrendo para a profundidade 0,10 m, mas com inclusão do T1, sem a intervenção da RP, o que mostra a eficiência da permanência do palhiço da cana-de-açúcar pós colheita mecanizada na redução da RP (Figura 9).

Os tratamentos T3 e T4 não atingiram DSc igual a zero, sendo esses, os que apresentaram melhores amplitudes de IHO, semelhantes as amplitudes da profundidade 0,10 m de 1,22 a 1,52 Mg m⁻³, corroborando com valores obtidos por Prado (2015).

Assim, alterações na estrutura do solo, relacionadas ao aumento da DS, reduzem a faixa do conteúdo de água sem limitações para o desenvolvimento do sistema radicular da cana (OTTO et al., 2011). Dessa forma um aumento na DS necessita de uma maior UV no solo, que apresente uma RP não limitante ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar (CAVALIERI et al., 2011).

Conforme Vischi Filho (2014), as faixas de água do solo sem limitações ao desenvolvimento da cana-de-açúcar são dependentes da DS e, conseqüentemente da estrutura do solo. Com base nesse indicador de qualidade estrutural, observou-se que menores reduções no IHO dos tratamentos com palhiço na superfície do solo, se deve à sua maior resistência à compactação, e permanecer quantidade de palhiço acima de 15 Mg ha⁻¹ seria inviável economicamente para uma usina que se dispõe a recolher o palhiço para produção de etanol de segunda geração e/ou energia.

Todas as curvas ajustadas dos modelos de CSC apresentaram coeficientes de determinação (R²) significativos a 1 % pelo teste F com coeficiente de determinação variando de 0,71** a 0,96** (Quadro 6) sendo semelhantes aos obtidos por Silva et al. (2009), Vichi Filho et al. (2014) e Prado (2015) e demonstrando boa confiabilidade.

Imhoff et al. (2001) sugeriram a utilização do ajuste linear para pressão de preconsolidação (σ_p) em função da UV e DS. O intervalo de confiança dos coeficientes do ajuste dos modelos é significativo de acordo como descrito por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012), pois não inclui o valor igual a zero, podendo então afirmar que são significativos.

QUADRO 6. Estimativas dos coeficientes “a” e “b” dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], com respectivos coeficientes de determinação (R^2) e número de amostras (n), coletadas em duas profundidades (0,10 e 0,30 m) de um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo.

Tratamentos	a			b			R^2	n
	Valor estimado	Intervalo de confiança		Valor estimado	Intervalo de confiança			
		Li	Ls		Li	Ls		
0,10 m								
T0	4,44	3,71	4,68	-5,65	-6,98	-4,32	0,85**	35
T1	3,33	3,04	3,63	-3,04	-3,89	-2,18	0,79**	35
T2	4,46	4,92	4,91	-5,90	-7,17	-4,64	0,87**	35
T3	4,11	3,69	4,53	-5,16	-6,37	-3,96	0,85**	35
T4	3,65	3,45	3,85	-3,80	-4,38	-3,23	0,92**	35
0,30 m								
T0	3,95	3,40	4,50	-4,24	-5,90	-2,58	0,71**	35
T1	3,99	3,82	4,16	-4,65	-5,18	-4,13	0,96**	35
T2	3,87	3,63	4,11	-4,16	-4,87	-3,45	0,90**	35
T3	3,51	3,30	3,73	-3,27	-3,91	-2,63	0,89**	35
T4	3,51	3,32	3,70	-3,09	-3,63	-2,55	0,90**	35

Li e Ls: limite inferior e superior do intervalo de confiança 95 %, respectivamente; T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹; ** significativo pelo teste “F” a 1%.

Contudo, a variação do conteúdo de água no solo, no trabalho, foi do ponto de murcha permanente até próximo da capacidade de campo, o que demonstrou que, nesse intervalo de umidade, a σ_p decresce linearmente com o incremento de umidade, como também observado por Severiano et al. (2010). Porém, quando o solo se encontra sob conteúdos de umidade superiores à capacidade de campo, essa relação é exponencial, o que justifica o uso do ajuste não linear proposto (BUSSCHER, 1990).

Apesar da carência de aplicações do referido ajuste na modelagem do comportamento compressivo do solo, a aceitação dessa proposta é baseada na significância das regressões (SEVERIANO et al., 2010). O que é afirmado por Blainski et al. (2009) e Blainski et al. (2012) salientam que quando o intervalo de confiança dos coeficientes do ajuste dos modelos de CSC não inclui o valor igual a zero, possibilita afirmar que estes foram significativos.

Para avaliar as possíveis alterações da estrutura do solo causadas pelas diferentes quantidades de palhiço deixadas na superfície do solo, os modelos de CSC

foram comparados utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares (SNEDECOR e COCHRAN, 1989) entre os tratamentos (Quadro 7).

QUADRO 7. Teste de significância de acordo com Snedecor e Cochran (1989) entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$] de um Latossolo Vermelho distroférico, nas profundidades de 0,10 e 0,30 m, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo.

Tratamentos	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
0,10 m			
T0 vs T1	NH	**	**
T0 vs T2	NH	**	**
T0 vs T3	NH	**	**
T0 vs T4	NH	**	**
T1 vs T2	NH	**	**
T1 vs T3	H	ns	ns
T1 vs T4	H	ns	ns
T2 vs T3	NH	**	**
T2 vs T4	NH	**	**
T3 vs T4	H	ns	ns
0,30 m			
T0 vs T1	NH	**	**
T0 vs T2	NH	**	**
T0 vs T3	NH	**	**
T0 vs T4	NH	**	**
T1 vs T2	NH	**	ns
T1 vs T3	H	ns	ns
T1 vs T4	H	ns	ns
T2 vs T3	NH	**	**
T2 vs T4	NH	**	**
T3 vs T4	H	ns	ns

F: testa a homogeneidade dos dados; b: coeficiente angular da regressão linearizada; a: intercepto da regressão linearizada; H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; * e ** significativo a 5 e 1 %, respectivamente. T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹.

Os resultados de homogeneidade entre os tratamentos T1, T3 e T4, com adição de palhiço se deve ao aporte de biomassa depositados na superfície do solo, fazendo com que esse palhiço que permaneceu na superfície do solo, dissipasse melhor o impacto do rodado do conjunto colhedora/transbordo, o que faz com que estas profundidades apresentem CSC semelhantes, conseqüentemente, aparentando uma melhor qualidade estrutural.

A não homogeneidade se devem a uma elevação no contato entre as partículas do solo quando a não cobertura de palhiço na superfície do solo, o que gera maior atrito

interno no solo e aumento dos valores de pressão de preconsolidação, em consequência da elevada densidade inicial do solo $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, na profundidade 0,10 m (Figura 10).

As comparações entre os modelos de CSC dos tratamentos nas profundidades 0,10 m e 0,30 m que não se diferenciaram, foram ajustadas uma única equação a todos os valores de σ_p e θ , obtendo-se assim um único modelo de CSC para esses tratamentos, das quais apresentaram diferenças pelo teste F, não foram realizadas nenhum agrupamento.

Os modelos de CSC entre os tratamentos nas profundidades 0,10 m e 0,30 m formaram os seguintes agrupamentos: 1° T4 = T3 = T1; 2° T2 e 3° T0, seguindo a mesma tendência nas duas profundidades com os mesmos tratamentos, corroborando com os agrupamentos obtidos por Prado (2015) onde também encontrou para o mesmo tipo de solo, 3 agrupamentos nos modelos de CSC. Segundo mesmo autor ao utilizar sorgo como alternativa de rotação em canavial, contribuiu para maior CSC, semelhante aos valores do atual trabalho com T0, onde não há adição de palhicho, apresentando elevadas densidades, o que pode limitar o crescimento radicular da cana (Figura 10 e 11).

A não obtenção de distintos modelos de CSC pode estar ligado a homogeneização proporcionada pelo preparo do solo antecipadamente ao plantio e o tempo de manutenção de palhicho na superfície após instalação do experimento, pois manteve maiores umidades, o que segundo Severiano et al. (2008) ocorre pelas constantes alterações da estrutura do solo ocasionadas pelas operações de cultivo convencional, que promovem a inversão das camadas e deposições diferenciais de partículas influenciando a σ_p .

Em todos os modelos de CSC a σ_p do solo tornou-se maior à medida que o solo se tornou mais seco, pois aumentou a coesão entre as partículas sólidas (Figura 10 e 11), o que está de acordo com Silva et al. (2006) que relataram que quando o solo seca a σ_p aumenta exponencialmente com a redução da umidade, aumentando a CSC do solo, o que proporciona um menor risco de ocorrência de compactação. Este comportamento da compressibilidade do solo também foi descrito por, Bergamin et al. (2015), Pereira et al. (2015) e Garbiate et al. (2016).

Nos modelos de CSC dos tratamentos agrupados e individual, observou-se um decréscimo exponencial da σ_p com o aumento da UV (Figura 10 e 11). Este comportamento compressivo do solo também foi descrito por Dias Junior (1994), Silva et al. (2006), Severiano et al. (2008), Bergamin et al., (2015), Pereira et al. (2015), Prado (2015), Vischi Filho (2014), Vischi Filho et al. (2015) e Garbiate et al. (2016).

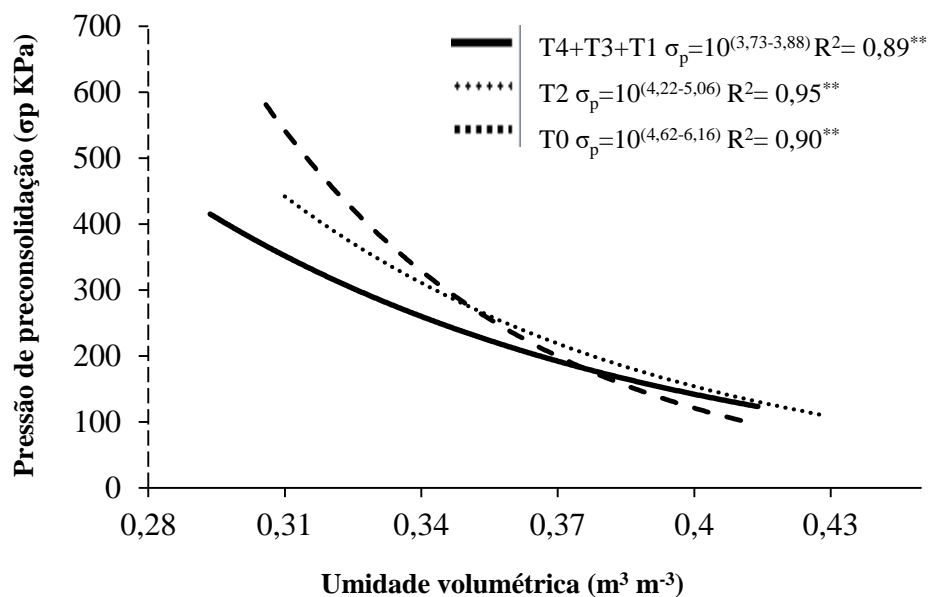


Figura 10. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade 0,10 m. T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹.

A menor CSC foi verificada nos tratamentos agrupados de T1+T3+T4 para as duas profundidades, o que pode estar relacionado à maior deposição de palhiço na superfície do solo, aumentando a capacidade de suportar a pressão exercida pelo contato rodado/solo, permitindo maior manutenção da umidade do solo e o ajuste entre as partículas quando submetido ao tráfego de máquinas (SEVERIANO et al., 2008; VISCHI FILHO, 2014; PEREIRA et al., 2015).

A aplicação de pressões sobre o solo menores que a pressão de preconsolidação causa deformações pseudo-elásticas e recuperáveis, enquanto a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas e não recuperáveis, resultando na degradação da estrutura do solo (DIAS JÚNIOR, 2000; BRAIDA et al. 2006 e 2010). Onde houve deposição de palhiço, o solo sofreu uma deformação, mas que podem ser recuperadas com o passar do tempo, ao contrário do tratamento sem adição de palhiço, permanecendo este, com baixa qualidade estrutural.

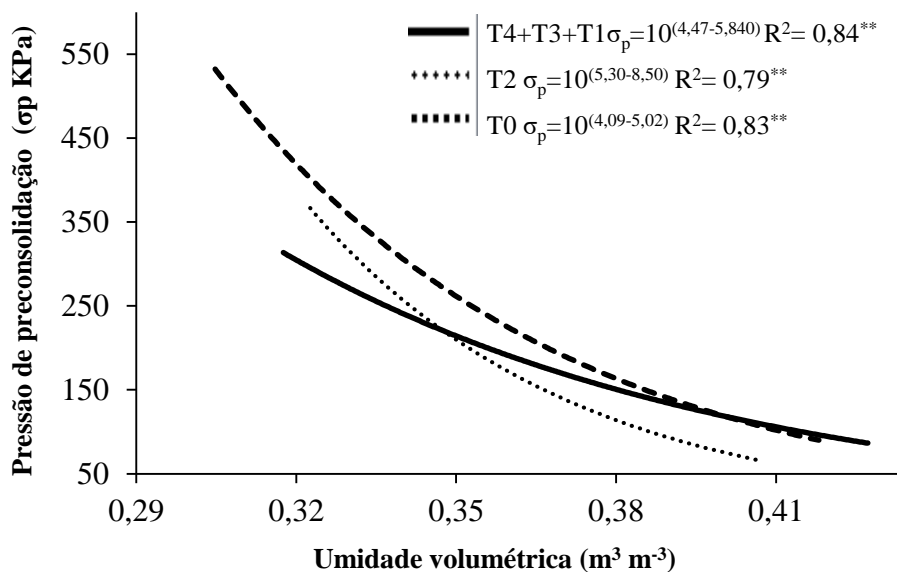


Figura 11. Modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho distroférico, sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar submetidos a diferentes níveis de palhiço no solo, na profundidade de 0,30 m. T0” Sem palhiço; “T1” 5 Mg ha⁻¹; “T2” 10 Mg ha⁻¹; “T3” 15 Mg ha⁻¹ e “T4” 20 Mg ha⁻¹.

A maior CSC indica maior DS e compactação onde foi encontrada sob o tratamento sem adição de palhiço T0 nas duas profundidades, ao longo de quase todo o intervalo de UV. Solos com valores elevados de σ_p apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes (LIMA et al., 2006) e apresentam menor chance de sofrer alteração na sua estrutura com o tráfego (SEVERIANO et al., 2008).

A compactação de forma não recuperável ocorre quando as pressões de contato do rodado ou dos implementos ultrapassam a capacidade de suporte de carga. Portanto, devem-se quantificar as pressões de contato ou carregamentos que são aplicados no solo em seu manejo e concomitantemente quantificar a CSC do solo, por meio da pressão de preconsolidação em função do teor água no solo (SILVA et al., 2003b).

Para o solo do presente estudo, a máxima de pressão que o mesmo suporta é com a permanência de palhiço na superfície do solo é uma pressão de 430 kPa com umidade volumétrica de 0,29 m³ m⁻³ na profundidade 0,20 m (Figura 10) e de 310 kPa com umidade volumétrica de 0,32 m³ m⁻³ na profundidade de 0,30 m (Figura 11).

O nível crítico de umidade em função da CSC com relação a entrada do conjunto colhedora, trator e reboque, com pressão média de 0,38 kPa que é exercida no conjunto utilizado no presente estudo é de 0,31 m³ m⁻³. Pressões acima dessa CSC e UV maior, ocorrerá compactação adicional para a profundidade 0,10 m.

Na profundidade 0,30 m houve tendência no aumento da σ_p , com valores superiores aos da profundidade 0,10 m, conforme a umidade volumétrica fosse menor. Com o aumento da umidade, as σ_p iam se igualando até a umidade de $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Na profundidade 0,10 m os agrupamentos com palhiço tiveram menores σ_p com o aumento dos valores de umidade volumétrica, se igualando até a umidade de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que está de acordo com Araújo-Junior et al. (2011) e Bergamin et al., (2015) onde os valores das umidades críticas para as culturas na profundidade 0,40 m de profundidade não foram estabelecidos, por ter sido considerado apenas a profundidade de 0-0,20 m, que é menos resistente à compactação para os manejos utilizados.

Levando em consideração as pressões médias exercidas pelos pneus da colhedora e do trator com transbordo, Vischi Filho (2014) trabalhando com mesmo tipo de solo verificou uma pressão de 146,63 kPa (solo sem palhiço) e 112,45 kPa no solo coberto com palhiço. Com essas pressões exercidas, as umidades críticas, para profundidade 0,10 m, nos agrupamentos com menor σ_p não ocorreriam, podendo o solo ser trafegado com estes maquinários em toda faixa de umidade. Resultado semelhante foi observado por Oliveira et al. (2003) e Severiano et al. (2010), cujos valores de pressão de preconsolidação crítica foram superiores aos valores de pressão de preconsolidação nos dois tipos de solos estudados.

Ao associar os valores de σ_p às pressões de contato do maquinário utilizado nesse estudo, pode-se afirmar que, considerando as condições estruturais do solo no momento de sua avaliação, se as operações mecanizadas forem realizadas dentro da faixa de friabilidade (Figuras 10 e 11 e Quadro 5 e 6), provavelmente não ocorrerá compactação adicional desses solos, pois as pressões de contato estão abaixo da sua capacidade de suporte de carga.

O solo com palhiço suporta mais pressões exercidas pelo efeito do tráfego de colhedoras e transbordo de cana-de-açúcar em comparação com aqueles que não apresentam resíduos vegetais (GARBIATE et al., 2016), enquanto que o palhiço da cana-de-açúcar depositada sobre o solo atenua as cargas aplicadas e dissipa em até 30% a energia de compactação (BRAIDA et al., 2010).

Notadamente a permanência de palhiço na superfície do solo, altera a estrutura do solo, amplia o intervalo hídrico ótimo, a densidade crítica em que o intervalo hídrico é igual a zero e diminui a CSC do solo para uma determinada umidade. Estas melhorias certamente advêm de benefícios decorrentes do aumento da matéria orgânica no solo, que, conforme Prada et al. (2010) relatam que o palhiço além de aumentar o

aporte de matéria orgânica no solo, dissipa em até 30% as cargas aplicadas ao solo por maquinários.

Com os modelos obtidos pode-se definir para Latossolo Vermelho distroférico (LVd) o momento ideal para a entrada dos equipamentos nos canaviais para a realização das operações agrícolas, sabendo-se o teor de água do solo por meio de um tensiômetro.

5 CONCLUSÕES

1. O tratamento sem adição de palhico foi o que apresentou menor qualidade estrutural.
2. Os tratamentos onde houve manutenção de palhico na superfície do solo proporcionam as maiores amplitudes do IHO e menores pressões de preconsolidação, apresentando melhores qualidades estruturais.
3. A CSC para o Latossolo Vermelho distroférico foi a uma pressão de 430 kPa com UV de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na profundidade de 0,10 m e uma pressão de 310 kPa com umidade volumétrica de $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na profundidade de 0,30 m nos tratamentos onde ocorreram adição de palhico.
4. A permanência de até 15 Mg ha^{-1} seria o ideal para manutenção da qualidade estrutural do solo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A., J. L. STAPE, P. C. SENTELHAS, J. L. M. GONC, ALVES. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theory Application Climatol.** 113, 407–427, 2013.

ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.6, p.651-660, 2013.

ARAUJO–JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.115-131, 2011.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p.507-514, 2005.

AUDE, M. I. S.; MARCHEZAN, E.; DARIVA, T.; PIGNATARO, L. H. B. Manejo do palhicho da cana-de-açúcar: efeito na produção de colmos industrializáveis e outras características agrônômicas. **Ciência Rural**, Santa Maria. v.23, n.3, p.281-286, 1993.

BARBOSA, L. A. P. **Compactação do solo gerada por pneus de alta flutuação de eixo livre e trativo**. 2012. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, F. R.; VENTUROSOS, L. R.; BERGAMIN, L. P. P.; CAMPOS, MILTON C. C. Relationship of soil physical quality parameters and maize yield in a Brazilian Oxisol. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 75, p. 357-365, 2015.

BETANCOURT, A. F. Matérias estrañas em la cosecha de la cana de azúcar. **Boletim Oficial de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba**, Habana, v. 22, n. 2, p. 3-29, 1976.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.7, p.849-856, 2003.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p.79-87, 2012.

BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. Auckland: McGraw-Hill. 218p. 1986.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.463-478.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.131-139, 2010.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.519-524, 1990.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 106p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CARVALHO, L. A.; REZENDE, I. S.; PANACHUKI, E. S.; JUNIOR, C. A.; NOVAK, E.; SILVA, G. F. C. Variáveis físicas do solo e produtividade de cana-de-açúcar sob sistemas de preparo na reforma de canal. **Agrarian Academy**, Goiânia, v.1, n.1, p.259-274, 2014.

CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação- IAC, 2008. Cap.3, p. 57 - 78.

CASTRO, A. M. C.; SANTOS, K. H.; MIGLIORANZA, E.; GOMES, C. J. A.; MARCHIONE, M. S. Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar. **Agrarian**, Dourados, v.6, n.22, p.415-422, 2013.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, p.1541-1550, 2011.

CEISE (Centro Nacional das Indústrias do Setor Sucroenergético e Biocombustíveis). **Usinas podem produzir novos 1.000 MW/ano de bioeletricidade**. Disponível em: <http://www.ceisebr.com/site/index.php/conteudo/visualizar/usinas-podem-produzir-novos-1.000-mwano-de-bioeletricidade>. Acesso em: 05 out. 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Cana-de-açúcar**. Acompanhamento safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 3 - Safra 2016/17, n. 1 - Primeiro levantamento, Brasília, p. 1-66, abril 2016.

COOK, F. J.; KNIGHT, J. H. Oxygen transport to plant roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.67, n.1, p.20-31, 2003.

COOPERSUCAR UNIÃO. **Características Agronômicas das Variedades SP**. 2012. Disponível em: <www.socicana.com.br/variedadescana/variedades%20sp.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2017.

COPERSUCAR. Projeto BRA/96/G31: disponibilidade da palhiço de cana-de-açúcar. **Cenbio Notícias**, Brasília, v. 4, n. 12, 1998.

COSTA, L. G.; MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P.; PINTO, H. M. S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C. Simulação do efeito do manejo da palhiço e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.5, p.469-474, 2014.

DEFILIPPI FILHO, L. C. **Estudo de viabilidade do uso do palhiço para geração de energia na entressafra de uma usina sucroenergética**. 2013. 133f. Dissertação (Mestrado Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas – EESP/FGV, São Paulo, 2013.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p.199-238, 1988.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-95.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Tese (Doctored Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing-MI.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Texas, v.8, p.139-151, 1995.

DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.1, p.1-8, 1996.

DONAGEMA, G.K. (2011) - **Manual de métodos de análise de solos**. 2ª ed. Revista. Rio de Janeiro, Embrapa solos, 212p.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Least limiting water range and physical quality of soil under ground cover management systems in citrus. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.67, n.4, p.448-453, 2010.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.;

LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação-IAC, 2008. Cap.1, p. 31 - 44.

GARBIATE, M. V.; VITORINO, A. C. T.; PRADO, E. A. F.; MAUAD, M.; PELLIN, D. M. P. Hydrophysical Quality of an Oxisol and Sugarcane Yield in Chisel Plow-Based Sugarcane Ratoon Management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-13, 2016.

GARCIA, R. A. **Rotação de culturas e propriedades físicas e matéria orgânica de um latossolo**. 2010. 146f. Tese (Doutorado em agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu - SP.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of American Journal**, v.32, p.180-186, 1968.

GRANTZ, S. A.; SLINKER, B. K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York: McGraw Hill, 1990. 777p.

GUIMARÃES, E. R.; MUTTON, M. A.; MUTTON, M. J. R.; FERRO, M. I. T.; RAVANELI, G. C.; SILVA, J. A. Free proline accumulation in sugarcane under water restriction and spittlebug infestation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 6, p. 628-633, 2008.

HAKANSSON, I. **Machinery induced compaction of arable soils. Incidence-Consequences-Countermeasures**. Swedish University of Agricultural Science. [S.l.]. 2005.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C., STEWARD, B. A. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1997. p.167-179. (Advances in Soil Science).

HILBIG, V. S.; BRANDT, A. A.; ZINK, A. D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; HORN, R. Palhico sobre o solo dissipa a energia aplicada pelas máquinas agrícolas?. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. **Anais...** Gramado, 2007. CD ROOM.

HORN, R., DOMZZAL, H., SLOWÍNSKA-JURKIEWICZ, A., Van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1-2, p.23-26, 1995.

IAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.523-530, 2006.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

IORI, P.; SILVA, R. B. da; DIAS JUNIOR, M. de S.; LIMA, J. M. de. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.1448-1456, 2012.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, J. 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**, Viçosa, v.33, n.4, p.845-855, 2009.

KONDO, M. K., DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.211-218, 1999.

KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid, inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, Bedford, v.7, n.1, p.52-56, 1991.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNO, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.151-170, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v1. p.277-294. 1985.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.217-223, 2006.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p.71-78, 2012.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.789-800, 2008.

LYASKO, M.I. The determination of deflection and contact characteristics of a pneumatic tire on rigid surface. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v.31, n.4, p.239-242, 1994.

MACEDO, N. M.; BOTELHO, P. S. M.; CAMPOS, M. B. S. Controle químico de cigarrinha-da-raiz em cana-de-açúcar e impacto sobre a população de artrópodes. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.21, p.30-33, 2003.

MARTINO, D. L.; SHAYKEWICH, C. F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.74, n.2, p.193-200, 1994.

MAZETTO, F.R.; LANÇAS, K.P.; NAGAOKA, A.K.; CASTRO NETO, P.; GUERRA, S.P.S. Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.750-757, 2004.

McDONALD, T.P.; STOKES, B.J.; AUST, W.M. Soil physical property changes after skidder traffic with varying tire widths. **Journal of Forest Engineering**, Peachtree Corners, v.6, n.2, p.41-50, 1995.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.5, p.584-590, 2012.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DLACHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.6, p.1811-1822, 2010.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey oxisols in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.71, n.2, p.109-119, 2003.

NOVAK, L. R.; MANTOVANI, E. C.; MARTYN, P. J.; FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.12, p.1587-1595, 1992.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.773-781, 2003.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.117, n.1, p.201-210, 2011.

PACHECO, E. P.; CANTALICE, J. R. B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos

Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.403-415, 2011.

PAULA, M.; PEREIRA, F. A. R.; ARIAS, E. R. A.; SCHEEREN, B. R.; SOUZA, C. C.; MATA, D. S. Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.3, p.633-640, 2010.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C. C.; 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**, Viçosa, v.28, n.5, p.911-917, 2004.

PELLIN, D. M. P.; MONTANARI, R.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; CORRÊA, A. R. Variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, p. 28-38, 2015.

PEREIRA, A. H. F.; VITORINO, A. C. T.; PRADO, E. A. F. do; BERGAMIN, A. C.; MAUAD, M.; ARANTES, H. P. Least Limiting Water Range and Load Bearing Capacity of Soil under Types of Tractor-Trailers for Mechanical Harvesting of Green Sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1603-1610, 2015.

PORTERFIELD, J. W; CARPENTER, T. G. Soil compaction: an index of potential compaction for agricultural tires. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.29, n.4, p.917-922, 1986.

PRADO, E. F. do. **Qualidade física promovida por manejos de solo e espécies na renovação do canavial**. 2015. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, 211-216, 1988.

RIBEIRO, H.; PESQUERO, C. Queimadas de cana-de-açúcar: avaliação de efeitos na qualidade do ar e na saúde respiratória de crianças. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.24, n.68, p.255-271, 2010.

RIPOLI, T. C. C. & RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros e Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302 p.

RIPOLI, T. C. C.; MIALHE, L. G.; BRITO, J. O. Queima de canavial: o desperdício não mais admissível. **Álcool & Açúcar**, Piracicaba, v. 10, n. 54, p. 18-23, 1990.

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA Jr. W. F.; NOGUEIRA, M. C. S.; MATOS, J. R. Equivalente energético da palhiço da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1990, Piracicaba. **Anais...**Piracicaba: FEALQ, 1990. p. 249-262.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009. 333 p.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n. 7, p. 744-750, 2001.

ROSS, P. J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K. L. Equations for extending water-retention curves to dryness. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.55, p.923-927, 1991.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, U. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92p.

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, v.88, p.844-851, 1996.

SCAPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação- IAC, 2008. Cap. 2, p. 47-56.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fonológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, M. H.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2006. Cap. 2, p. 19-36.

SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, C. M. A.; PRADO, E. D.; VENTURIN, J. C.; YAMAMOTO, N. T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, La Habana, v.17, p.61-65, 2008.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. de P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - Quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.414-423, 2010.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; COSTA K. A. P.; SILVA, F. G.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: I – relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.773-782, 2011.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; DIAS JÚNIOR, M. S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.1, p.159-168, 2009.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.921-930, 2006.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.884-888, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A. R.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.207-216, 2006.

SILVA, J. A. **Atributos químicos, físicos e agronômicos de cana-soca submetida a níveis de palhço**. 2015. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

SILVA, M. S. L.; RIBEIRO, M. R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.16, p.397-402, 1992.

SILVA, R. B.; IORI, P.; SOUZA, Z. M. de; PEREIRA, M. G. P.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. M. de. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 265-278, 2016.

SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.973-983, 2003a.

SILVA, R. B.; IORI, P.; LANÇAS, K. P.; DIAS JÚNIOR, M. S. Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.33, n.1, p.376-3789, 2010.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; DIAS JUNIOR, M. S. Limite da Terra. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.96, p.12-19, 2003b.

SILVA, R. B.; LIMA, J. M.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M. Influência da adição de fósforo no índice de compressão e propriedades de consistência de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.261-268, 2001.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; 986CARMO, J.F.A.; SOUZA, L.S.B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, p.500-509, 2012.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da RP em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2004.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8 ed. Ames: Iowa State University Press, 1989, 503 p.

SOUZA, G. S. de; SOUZA, Z. M. de; SILVA, R. B. da; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.135-146, 2014.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n.3, p. 270-277, 2015.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

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

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-760, 2004.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JR., J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.102, p.18-22, 1966.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non-limiting water range (NLWR): An approach for assessing soil structure**. Ottawa: Soil Quality Evaluation Program, Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2).

TORMENA, C. A. SILVA, A. P. GONÇALVES, A. C. A. FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: Um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, p. 286-292, 1999.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.333-339, 1996.

TRIVELIN, P. C. O.; RODRIGUES, J. C. S.; VICTORIA, R. L. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia^{-15N} e uréia^{-15N} aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.2, p.89-99, 1996.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. **Unidades do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.udop.com.br/index.php?item=unidades®iao=CS&estado=SP>. Acesso em: 08/12/2016.

UNICA. União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. **Açúcar e álcool do Brasil: commodities da energia e do meio Ambiente**. 2015. Disponível em: <http://www.unica.com.br/faq/>. Acesso em: 14 jul. 2016.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Linha do Tempo da Cana-de-açúcar no Brasil**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo/index.html>>. Acesso em: 08/01/2014b.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Raio X do Setor Sucroenergético**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 08/01/2014a.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.849-858, 2003.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; MOURA, G. B. A.; ROLIM, M. M.; MONTENEGRO, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrófico coeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.525-536, 2012.

VISCHI FILHO, O. J. **Indicadores físicos e mecânicos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar em áreas comerciais**. 2014. 153f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M. de; SOUZA, G. S. de; SOUSA, A. C. M. de; SILVA, R. B. da. Intervalo hídrico ótimo em área de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de colheita mecanizada. **Irriga**, Botucatu, v. 1, p. 96-108, 2016.

VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M. de.; SILVA, R. B. DA.; LIMA, C. C. de.; PEREIRA, D. M. G. de.; LIMA, M. E. de.; SOUSA, A. C. M. de.; SOUZA, G. S. de. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, p. 322-332, 2015.