

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONTROLE DE TRÁFEGO EM ÁREA CULTIVADA COM
CANA-DE-AÇÚCAR**

ANTONIANE ARANTES DE OLIVEIRA ROQUE

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CONTROLE DE TRÁFEGO EM ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação de mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola na área de
concentração em Água e Solo.

ANTONIANE ARANTES DE OLIVEIRA ROQUE

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

R685c Roque, Antoniane Arantes de Oliveira
Controle de tráfego em área cultivada com cana-de-
açúcar / Antoniane Arantes de Oliveira Roque. --
Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solos - Manejo. 2. Cana-de-açúcar. 3. Máquinas
agrícolas . 4. Solos - Produtividade. I. Souza, Zigomar
Menezes de. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Traffic control in area cultivated with sugar cane

Palavras-chave em Inglês: soil management, Sugar cane, Farm machinery, Soil
attributes

Área de concentração: Água e Solos

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

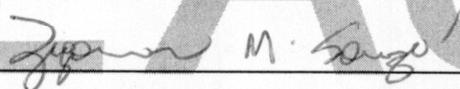
Banca examinadora: Marcílio Vieira Martins Filho, Paulo José Rocha de
Albuquerque

Data da defesa: 26/02/2010

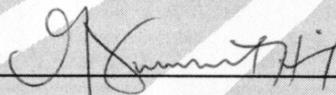
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Antoniane Arantes de Oliveira Roque**, aprovado pela Comissão Julgadora em 26 de fevereiro de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

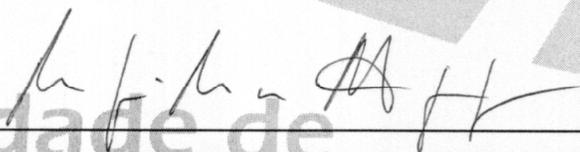
FEAGRI



**Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho – Membro Titular
FCAV/Unesp**



**Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque - Membro Titular
FEC/Unicamp**

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

***Transportai um punhado de terra todos os dias
e fareis uma montanha.***

Confúcio

AGRADECIMENTOS

À Deus pela iluminação e saúde concedidos para chegar até este ponto desta etapa de minha vida.

À minha mãe, pelo exemplo de vida e amor incondicional, que se transformaram no que sou hoje.

À minha amada companheira Gabriela, pela ajuda em diversas fases desta pesquisa e pela paciência nos momentos de ausência.

Ao meu querido filho Ivan, por entender as interrupções em nossas brincadeiras e pela compreensão pelo silêncio.

Ao excepcional professor Zigomar, que com muito dinamismo conduziu este experimento e me deu forças para continuar, enfrentando várias adversidades a meu favor.

À Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola (UNICAMP/FEAGRI), pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

À Usina São Martinho, pela concessão das condições materiais para realização do experimento e pelo apoio na condução deste.

Ao professor Gener Tadeu Pereira (UNESP/FCAV) pelo delineamento experimental e pela atenção e presteza na análise estatística.

Ao professor Luiz Antonio Rossi (UNICAMP/FEAGRI) por incentivar a minha entrada no curso de Mestrado.

Ao Técnico Agrícola Luciano do setor de qualidade da Usina São Martinho pela condução do experimento e ajuda nas coletas de campo, resolvendo com agilidade e empenho todos os problemas que apareceram.

À técnica Célia Panzarin Gonçalves, do laboratório de solos da Feagri pelo carinho nas conversas e pela condução das análises laboratoriais.

Ao profissional de pesquisa Antonio Javarez Junior, do laboratório de solos da Feagri, pela paciência nas explicações e pela condução das análises laboratoriais.

Aos amigos de Pós-Graduação, Ronny, Gustavo, Fernando, Gilka e Lorena, pela alegria nas coletas de campo e pela ajuda nas análises laboratoriais.

À Laura Fernanda Simões da Silva, aluna de doutorado da Feagri, pela ajuda na confecção do intervalo hídrico ótimo.

Ao técnico José Maria da Silva, da seção de protótipos da Feagri, pela ajuda no conserto e preparação de diversos equipamentos, de forma rápida e profissional.

Ao Timbú (Rafael Mandoni), aluno de graduação, pela grande ajuda nas coletas de campo.

Ao professor Edson Eiji Matsura (UNICAMP/FEAGRI), pela solução do problema com as placas porosas.

Ao meu antigo chefe Antonio Carlos de Souza (SAA/CATI), pelo apoio e incentivo na continuidade do curso e ao meu atual chefe e amigo Mário Ivo Drugowich (SAA/CATI), pelas leituras da dissertação e várias dicas baseadas em sua experiência prática.

Ao pesquisador Flavio Arruda (APTA/IAC), pela disponibilização do laboratório de hidráulica da fazenda Santa Elisa, para realização de parte das análises.

Aos funcionários da Usina São Martinho pelo profissionalismo na realização dos trabalhos de campo.

Aos professores Paulo J. R. Albuquerque (UNICAMP/FEC) e Marcilio V. M. Filho (UNESP/FCAV), membros da banca de avaliação, pelas contribuições trazidas à este trabalho.

Ao professor Ignacio M. Dal Fabbro (UNICAMP/FEAGRI) por gentilmente realizar a correção do abstract.

E finalmente a todos os professores, funcionários, amigos e colegas que conheci na Feagri, pelo apoio, sugestões, amizade e convivência.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVAS.....	3
3. HIPÓTESE DO TRABALHO.....	5
4. OBJETIVOS.....	5
4.1. Objetivo Geral.....	5
4.2. Objetivos Específicos.....	5
5. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
5.1. Tráfego de máquinas agrícolas e compactação do solo.....	6
5.2. O tráfego de maquinário agrícola e seu efeito na física do solo.....	9
5.3. Controle de tráfego na mecanização agrícola.....	12
6. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
6.1. Localização e descrição da área de estudo.....	17
6.2. Aspectos do controle de tráfego na área da pesquisa.....	18
6.3. Parcelas Experimentais.....	19
6.4. Coleta das amostras de solo.....	21
6.5. Caracterização física do solo.....	22
6.6. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	23
6.7. Produtividade da cultura de cana-de-açúcar.....	24

6.8. Análises estatísticas.....	25
6.9. Condições de campo.....	26
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
7.1. Análise granulométrica.....	29
7.2. Interação manejo e profundidade – anos de 2008 e 2009	30
7.3. Interação manejo e local – anos de 2008 e 2009	37
7.4. Análise conjunta – comparação dos anos de 2008 e 2009	43
7.5. Curva de retenção de água.....	47
7.6. Intervalo hídrico ótimo	52
7.7. Produtividade	55
8. CONCLUSÕES	57
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
10. ANEXOS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo no estado de São Paulo com destaque em foto aérea.	17
Figura 2. Trator com bitola estendida e esquematização da área, sendo (LP) linha de plantio e (R) eixo do rodado do trator.	18
Figura 3. Imagens do sistema de piloto automático.	19
Figura 4. Croqui da área experimental.	20
Figura 5. Área do experimento com a indicação dos pontos de coleta.	21
Figura 6. Transbordo sobre a balança para pesagem a campo.	25
Figura 7. Proteção do solo pela palhada no sistema de cana crua.	27
Figura 8. Trator com os transbordos acoplados.	27
Figuras 9. Pneus de alta flutuação para redução da compactação.	27
Figura 10. Área do experimento após a colheita.	28
Figura 11. Curva de retenção de água para os sistemas de manejo da cana-de-açúcar com controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nos diferentes locais de amostragem (linha de plantio-LP, entre rodado-ER e rodado-R), para a profundidade de 0,00-0,10 m.	48
Figura 12. Curva de retenção de água para os sistemas de manejo da cana-de-açúcar com controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nos diferentes locais de amostragem (linha de plantio-LP, entre rodado-ER e rodado-R), para a profundidade de 0,10-0,20 m.	49
Figura 13. Curva de retenção de água para os sistemas de manejo da cana-de-açúcar com controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nos diferentes locais de amostragem (linha de plantio-LP, entre rodado-ER e rodado-R), para a profundidade de 0,20-0,30 m.	51

Figura 14. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, para os manejos testemunha, piloto automático e controle de tráfego na profundidade de 0,00-0,20 m, após o primeiro ano do experimento. A área cinza representa o IHO, contido no gráfico à direita.	54
Figura 15. Pneu traseiro do trator – Trelleborg TM900 650/85 R38.....	69
Figura 16. Pneu dianteiro de trator – Trelleborg TM900 600/70 R30.....	69
Figura 17. Esteira da colhedora vista de frente	69
Figura 18. Colhedora de cana-de-açúcar.....	69
Figura 19. Detalhe do aumento da bitola do eixo dianteiro do trator	69
Figura 20. Detalhe do aumento da bitola do eixo traseiro do trator	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quadro de variância do experimento.....	26
Tabela 2. Atributos granulométricos e relação silte/argila para os manejos controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.....	29
Tabela 3. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para os sistemas de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, no ano de 2008.....	31
Tabela 4. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para os sistemas de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, no ano de 2009.....	33
Tabela 5. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para o sistema de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) em diferentes pontos de coleta, no ano de 2008.....	39
Tabela 6. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para o sistema de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) em diferentes pontos de coleta, no ano de 2009.....	40
Tabela 7. Testes estatísticos entre o primeiro e segundo ano do experimento para o sistema de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) na linha de plantio (LP), no enterrrodado (ER) e no rodado (R), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.....	44

RESUMO

Com a adoção da colheita mecanizada no sistema de manejo da cana-de-açúcar, surge a preocupação da compactação do solo e seus efeitos danosos nos atributos físicos do solo, com reflexos na produtividade da cultura. Uma recente técnica de manejo da mecanização agrícola denominada controle de tráfego representa uma alternativa para o cultivo de cana-de-açúcar, pois separa as zonas de tráfego daquelas em que há crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas, podendo diminuir substancialmente a compactação do solo. O presente trabalho teve por objetivo estudar o efeito do controle de tráfego em áreas cultivadas com cana-de-açúcar na compactação do solo, no sistema de cana colhida mecanicamente sem queima (cana crua). O projeto foi desenvolvido em área cultivada com cana-de-açúcar com os seguintes tratamentos: 1- cana-de-açúcar com colheita mecanizada tradicional; 2- cana-de-açúcar com controle de tráfego – aumento de bitola; 3- cana-de-açúcar com controle de tráfego – aumento de bitola e piloto automático. Os atributos físico-hídricos do solo avaliados foram: análise granulométrica, densidade do solo, estabilidade de agregados, porosidade do solo, resistência do solo à penetração, teor de matéria orgânica, curva de retenção e intervalo hídrico ótimo nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, em diferentes locais de coleta das amostras. O trabalho foi realizado dentro de um experimento trifatorial, com parcelas subdivididas no delineamento em blocos ao acaso. Os efeitos positivos devido ao uso do controle de tráfego em áreas cultivadas com cana-de-açúcar não foram identificados, conforme esperado pela hipótese deste trabalho. Verificou-se aumento da densidade do solo e diminuição do diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e porcentagem de agregados > 2,0 mm, tanto em profundidade como da linha de plantio em direção ao rodado do trator. Os valores de macroporosidade diminuíram da linha de plantio em direção ao rodado e a microporosidade apresentou resultados inversos. As curvas de retenção de água demonstraram um aumento da disponibilidade de água em profundidade. O intervalo hídrico ótimo permitiu verificar que os manejos com controle de tráfego apresentaram uma melhor disponibilidade de água às culturas. Não se obteve diferença significativa entre as produtividades tanto entre manejos como entre anos.

Palavras-chave: trafegabilidade, piloto automático, manejo do solo.

ABSTRACT

The adoption of mechanized harvesting associated to the sugar cane handling system generates ground compaction which affects soil physical attributes and consequently crop productivity. The recent handling technique named traffic control is viewed as an alternative for sugar cane mechanization, in which traffic space is separated from plant growing spaces, concentrating the tires path in delimited lines, being able provide significant reduction of soil compactation. The present work had the objective of studying the effect of traffic control in areas cultivated with sugar cane supported by mechanical harvesting system with no straw burning practice (raw sugar cane). The project was developed in area cultivated with sugar cane including the following treatments: 1 – sugar cane with traditional mechanized harvesting; 2 – sugar cane with traffic control – augmented span; 3 – sugar cane with traffic control - augmented span and automatic driving. The evaluated soil physical-hydrological attributes included: grain sized analysis, soil density, aggregate stability, soil porosity, soil resistance to penetration, organic matter content, substances retention curves and optimal hydrological interval at the depths of 0.00-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.30 m, at different places of sample collection. The research work was carried under a tri-factorial experimental design, with parcels subdivided into random block-type delineation. The positive effects of traffic control in areas cultivated with sugar cane were not been identified, as it was expected and stated in the hypothesis of this research work. Increasing soil density and reduction of the weighed average particle diameter was verified, geometric average particle diameter and percentage of aggregates > 2.0 mm, in depth as well as on tractor tire path. Macroporosity values showed lower values on tractor tire path on the plantation line and microporosity presented inverse results. Water retention curves had demonstrated increasing values of available water at increasing depth values. The minimum limiting water range allowed verifying that the management systems with traffic control had presented better water availability to sugar cane crop. Significant productivity differences between management systems and growing years had not been observed.

Word-key: traffic control, automatic tractor guidance, soil management.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil se defronta com a perspectiva de um aumento significativo da demanda de álcool combustível. Esta previsão se sustenta devido ao aumento do consumo de álcool hidratado pelo sucesso da introdução da alternativa bi-combustível no mercado de veículos automotivos leves e pela expansão das exportações brasileiras de álcool em função do crescente interesse mundial pela mistura do álcool à gasolina, tendo em vista os altos preços do petróleo e a busca por combustíveis renováveis. Panoramas apontam a necessidade de dobrar a produção de álcool brasileiro nos próximos 5 a 10 anos. Este importante salto de produção vem se tornando realidade por meio da implantação de novas usinas e, exigirá paralelamente, um esforço concentrado na busca de um aumento significativo na produtividade alcançada em volume de álcool produzido por hectare/ano de cana plantada.

Este aumento na produção deverá ser pautado na otimização do uso das áreas de cultivo, sendo, portanto, relevante a adoção de um sistema de manejo da cana-de-açúcar que minimize a degradação do solo, para que esta ocorra de maneira sustentável. Uma das alternativas colocadas neste novo cenário foi a adoção da colheita mecanizada, que trouxe benefícios na escala de cultivo, na uniformização dos canaviais e no rendimento do setor como um todo.

O progresso da mecanização agrícola nos canaviais resultou em tratores cada vez mais pesados e maiores, tendo a potência destas máquinas se tornado cinco vezes maior do que eram em sua origem. Tal processo não foi acompanhado por uma melhor distribuição destes pesos, com o aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em alterações nos atributos físicos e mecânicos do solo. A modernização da agricultura, com o aumento do peso das máquinas e equipamentos e, da intensidade de uso do solo é a principal causa da compactação deste, trazendo prejuízos para a produtividade das culturas e contribuindo com processos erosivos.

Esta mecanização, para o caso específico da cultura da cana-de-açúcar, já utilizada pela grande maioria dos produtores (usinas), tende a aumentar no estado de São Paulo com o decreto de Lei Estadual 47.700, de 11 de março de 2003, que regulamenta a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002. Esta lei determinou prazos para a eliminação gradativa do

emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas, favorecendo o emprego da colheita mecanizada ao invés da colheita manual.

O processo atual de produção de cana-de-açúcar está baseado em unidades que realizam o plantio e o cultivo em linha (uma ou duas) com tratores que tem no máximo 2,0 m de bitola. Já a colheita é feita em linhas simples, acompanhada do veículo de transbordo na linha adjacente. Como consequência tem-se um tráfego intenso, resultando em um baixo rendimento operacional, alto custo e alta compactação dos solos, sendo um dos fatores que obrigam a reforma do canavial a cada cinco anos.

Atualmente há uma grande preocupação com o aumento das áreas agrícolas com problemas de compactação, o que em grande parte se deve às operações mecanizadas realizadas em condições de umidade elevadas, o que favorece este processo. Estima-se que cerca de 68 milhões de hectares das terras agrícolas do planeta estão em processo de degradação, ocasionados pela compactação (ALAKUKKU *et al.*, 2003).

No contexto da agricultura mecanizada, o controle de tráfego surge como uma alternativa para o cultivo de cana-de-açúcar, pois minimiza os efeitos adversos da mecanização agrícola, separando as zonas de tráfego daquelas em que há crescimento das plantas e concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas, assim, uma área menor será atingida, embora mais intensamente. Esta é uma prática recente, que vêm sendo bastante utilizada na Austrália, que tem como objetivo uma resposta direta aos problemas da compactação do solo.

A adoção do controle de tráfego permite, além das melhorias na estrutura física do solo, uma redução do uso de combustível, pois uma maior porção de solo estará não compactado, apresentando menor oposição ao avanço dos implementos e também pela melhora do potencial de tração do solo (relação pneu-solo), aumentando então o rendimento da tração devido ao tráfego do maquinário sobre solo mais compactado (linhas de tráfego).

Portanto, torna-se necessário o estudo do efeito das diferentes práticas de controle de tráfego sobre os atributos físicos e hídricos do solo, auxiliando na comprovação científica destas e na difusão de seu uso no cenário nacional. Dentre esses atributos, destacam-se os componentes da porosidade relacionados com a retenção e o fluxo de água e ar no solo, o impedimento mecânico ao crescimento das raízes, dentre outros atributos importantes na interação solo-planta.

2. JUSTIFICATIVAS

Não houveram muitas mudanças na produção de cana-de-açúcar no Brasil até o início da década de 70, quando na administração Geisel, foi criado o Programa Brasileiro do Alcool (PROÁLCOOL). O programa provocou um grande aumento da área destinada ao cultivo da cana no Brasil, que se estendia por mais de 6,6 milhões de hectares na safra de 2007/2008.

O agronegócio sucro-alcooleiro fatura, direta e indiretamente, cerca de R\$ 40 bilhões por ano, o que corresponde a aproximadamente 2,35% do PIB nacional, ajudando o país a aumentar as exportações e reduzir sua dependência da importação de petróleo. É, também, um dos setores que mais empregam no país, com mais de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos, e reúne mais de 72.000 agricultores. Na safra 2008/2009, 569 milhões de toneladas de cana foram colhidas.

O Estado de São Paulo responde por mais de 50% da produção de cana-de-açúcar do Brasil. Além de ser o maior produtor, o Estado de São Paulo conta atualmente com o parque sucro-alcooleiro mais tecnificado, sendo o que mais emprega a colheita mecanizada, justificando-se, portanto, o estudo desta mecanização e apresentando-a como uma alternativa viável para este setor, com reconhecidos benefícios ambientais e econômicos.

A colheita mecanizada, entretanto, tem trazido alguns prejuízos para o setor, pois causa a compactação excessiva dos solos, aumentando-se gastos com o revolvimento do solo, diminuindo a produtividade do canavial pelo impedimento ao crescimento das raízes e perdas de solo por erosão pelo fato deste perder sua estrutura.

Atualmente grande parte da colheita de cana no Brasil ocorre manualmente e com queima, o que não é necessário para a colheita mecanizada, o que reafirma sua importância sob o ponto de vista ambiental. No sistema de colheita mecanizada sem queima, as folhas, bainhas, ponteiro, além de quantidade variável de pedaços de colmo são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal denominada palha ou palhada.

O ciclo de produção da cana-de-açúcar, hoje com cerca de cinco cortes, concebido para maximizar os ganhos de sacarose, pode ser revisto com a adoção das técnicas de controle de tráfego, visando maximizar a produção de biomassa e também minimizar os impactos ambientais. Um prolongamento do ciclo, associado a uma redução das operações e controle de

tráfego, pode diminuir substancialmente a compactação do solo, melhorando-se as condições de desenvolvimento das plantas, tendo-se relatos de usinas que chegam a efetuar 10 cortes com pouca diminuição da produção.

Direcionar o tráfego entre as linhas de plantio reduzirá a necessidade de aração, subsolagem e outras práticas de cultivo permitindo gradualmente programar a prática do plantio direto em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. O controle de tráfego tem um grande potencial para ser aplicado em regiões onde existe a possibilidade de uma sistematização do terreno (talhões mais uniformes), principalmente nas novas áreas que estão sendo destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar, reduzindo a necessidade de investimentos para revolver o solo ao longo dos anos.

3. HIPÓTESE DO TRABALHO

O controle de tráfego utilizando o aumento da bitola do maquinário agrícola ou pelo uso do piloto automático em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, reduz os efeitos adversos ao solo promovidos pela compactação, a qual é causada pelo tráfego de máquinas no sistema de cana colhida mecanicamente sem queima (cana crua).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar as alterações nos atributos físicos do solo produzido pelo controle de tráfego, utilizando-se aumento de bitola e piloto automático, em área cultivada com cana-de-açúcar, determinando sua influência na linha do rodado, na linha de cultivo e em profundidade.

4.2. Objetivos Específicos

1. Avaliar a resistência do solo à penetração, a porosidade, a densidade, e a estabilidade de agregados em solo com e sem controle de tráfego;
2. Estudar as relações hídricas no solo, por meio da curva de retenção de água, umidade no momento das coletas e intervalo hídrico ótimo em solo com e sem controle de tráfego;
3. Avaliar a produtividade da cultura de cana-de-açúcar em área com e sem controle de tráfego.

5. REVISÃO DE LITERATURA

5.1. Tráfego de máquinas agrícolas e compactação do solo

Os solos agrícolas vêm sofrendo grandes perturbações, dentre as quais a compactação pode ser apontada como a principal causa destas mudanças em virtude do tráfego de tratores e máquinas agrícolas em condições inadequadas de manejo. Algumas práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nos atributos físicos do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias. Assim, o interesse em avaliar a qualidade física do solo tem sido incrementado por considerá-lo como um componente fundamental na manutenção e/ou sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

A compactação do solo é a compressão do solo parcialmente saturado provocando uma reorganização estrutural das partículas e de seus agregados, resultando em aumento da densidade do solo e redução da porosidade total e dos macroporos (DIAS JÚNIOR, 2000). Ocorre principalmente em decorrência do excesso de pressão exercida pelo tráfego de máquinas e equipamentos sobre o solo em condições de excesso de água e do não revolvimento anual do solo.

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA *et al.*, 2004). Para a Pedologia, a compactação do solo é definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes do solo (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

As operações agrícolas para manejo do solo, quando realizadas sem o controle do teor de água nos solos, provocam aumento da área compactada do solo (PEDROTTI e DIAS JÚNIOR, 1996), o que pode reduzir a infiltração e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas, comprometendo a produtividade das culturas.

Ao se aplicar uma carga na superfície de um terreno, numa área bem definida, os acréscimos de tensão numa certa profundidade não se limitam à projeção da área carregada. Nas laterais da área carregada também ocorrem aumentos de tensão, que se somam às anteriores devidas ao peso próprio. Denominam-se isóbaras as curvas ou superfícies obtidas ligando-se os pontos de mesma tensão vertical. Este conjunto de isóbaras forma o que se chama

bulbo de tensões (HILLEL, 1980; CAMARGO e ALLEONI, 1997), o que demonstra a influência destas cargas além do local em que foram aplicadas e em profundidade.

O crescimento do setor sucro-alcooleiro no estado de São Paulo tem sido sustentado com a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas (SOUZA *et al.*, 2005). Isso contribui para aumentar as áreas com problemas de compactação, provavelmente pela ausência de um cronograma de trabalho bem definido ou de modelos capazes de estimar a capacidade de suporte do solo (SOUZA *et al.*, 2006a). Muitas vezes, o preparo do solo é realizado sem levar em conta sua umidade, a qual é um fator controlador da compactação (DIAS JÚNIOR, 2000).

Para Lal (1991) o preparo do solo compreende um conjunto de técnicas que, usadas racionalmente, podem permitir altas produtividades das culturas a baixo custo, mas se irracionalmente utilizadas podem levar à degradação do solo. Nesse sentido, Furlani (2000) comentou que a escolha de um sistema de preparo é extremamente difícil, principalmente devido às variações dos diversos tipos de solos, teores de água, coberturas vegetais sobre a superfície, culturas a serem implantadas, níveis tecnológicos e métodos de conservação.

Pesquisadores têm verificado que o acentuado tráfego de máquinas e equipamentos pesados sobre o solo provocam a sua compactação superficial até a profundidade de 0,15 a 0,20 m (HORN *et al.*, 1995; BEUTLER *et al.*, 2001; RICHART *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2006b). Segundo Hakansson e Voorhees (1997) sistemas que proporcionam pouco revolvimento do solo e apresentam tráfego de máquinas pesadas, podem promover compactação do solo até 0,4 m, como no sistema de cultivo da cana-de-açúcar.

A densidade máxima que um determinado solo pode atingir depende da granulometria e do formato do grão, aqueles cuja textura estão entre média a grossa e teores de silte menor que 40% (arenosos), atingem valores mais altos de densidade do solo se comparado aos solos de textura mais fina (argilosos), os quais devido ao maior volume de microporos não podem ser compactados à densidades mais altas e, por apresentarem proporções de macroporos limitantes (HORN *et al.*, 1995).

O preparo periódico do solo é a operação que mais consome energia, sendo na maioria das vezes realizada de forma abusiva e sem critérios racionais. O tráfego e o uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas no processo produtivo, tem acarretado excessiva mobilização do solo, degradando seus atributos físicos e introduzindo a compactação (SALVADOR, 1992). Segundo Horn *et al.* (1995) não somente a pressão estática causa

compactação, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento. Investigações têm mostrado o efeito do tráfego contínuo e inadequado de máquinas e implementos sobre os atributos físicos e mecânicos dos solos agrícolas (NOVAK *et al.*, 1992; HAKANSSON e VOORHEES, 1997; RICHART *et al.*, 2005; SOUZA *et al.*, 2005).

A compactação por pneus pode ser superficial, provocada pela pressão do ar nos pneus, e subsuperficial, provocada pelo peso por eixo dos tratores, colhedoras e máquinas agrícolas (HAKANSSON e VOORHEES, 1997). A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo/pneu e solo/implemento em superfície e em profundidade, respectivamente. Essas tensões compactam as diferentes camadas do solo e, caso este carregamento dinâmico exceda a resistência interna do solo, mudanças nos atributos físicos das camadas mais profundas ocorrerão (HORN *et al.*, 1995).

As conseqüências da compactação como um todo se manifestam no solo e na planta. No solo, ocorre a presença de zonas endurecidas, empoçamento de água e erosão hídrica com conseqüência no assoreamento dos mananciais de água. Na planta, ocorre redução da penetração das raízes por excessiva resistência do solo à penetração, deficiência de oxigênio, menor desenvolvimento vegetativo da parte aérea e redução significativa da produtividade (SECCO *et al.*, 2004). Desta forma, controlar o tráfego de máquinas agrícolas sobre as áreas de plantio, pode promover um aumento significativo da produtividade das culturas, devido a um menor efeito da compactação sobre as áreas plantadas (DICKSON e CAMPBELL, 1990; CHAMEN e AUDSLEY, 1997).

É importante a seleção e utilização de atributos físicos sensíveis ao manejo e relacionados com a produção, monitoramento da qualidade do solo, maximização da produção das culturas e manutenção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, minimizando a degradação dos solos e do meio ambiente (BEUTLER *et al.*, 2004). Segundo Letey (1985), os atributos físicos do solo são classificados como diretamente e indiretamente relacionados com o crescimento das plantas, sendo a água, o oxigênio, a temperatura e a resistência do solo à penetração os que têm relações diretas com o crescimento radicular e, a densidade do solo, a porosidade, a infiltração de água, a agregação e a textura os de relações indiretas. A densidade do solo apresenta uma relação direta com a resistência do solo à penetração (BORGES *et al.*, 1988), enquanto o conteúdo de água no solo tem influência negativa sobre a resistência do solo à penetração (TORMENA *et al.*, 1998).

Para que o desenvolvimento do setor sucro-alcooleiro ocorra de maneira sustentável é importante quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar a sua compactação, bem como a identificar e quantificar os efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo, de tal maneira que seja possível adaptar as atividades de forma condizente com o desenvolvimento sustentável que se deseja para o setor.

5.2. O tráfego de maquinário agrícola e seu efeito na física do solo

O tráfego agrícola é a principal causa da modificação dos atributos físicos do solo, que foi intensificada pela modernização da agricultura e, em consequência ocorre uma redução significativa da produtividade das culturas em decorrência da compactação do solo que inibe o desenvolvimento do sistema radicular.

Segundo Bertol *et al.* (2000) a magnitude dos efeitos do manejo sobre os atributos físicos do solo é determinada por condições climáticas, classe de solo, sistemas de rotação de culturas utilizados, tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e condição de umidade do solo em que são realizadas as operações de campo.

Sabe-se que um solo pode apresentar boas condições químicas, mas se o mesmo apresenta compactação, as plantas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes, pois o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado, uma vez que é nas novas raízes que ocorre a maior taxa de absorção de nutrientes (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2000).

O trânsito de máquinas sobre o solo, quando esse se encontra em condições inadequadas de umidade (acima da capacidade de campo e próximo da saturação), é uma das principais causas da compactação excessiva observada em muitas lavouras e que resulta em danos à produção das culturas vegetais (HILLEL, 1980). A condição de umidade do solo é fator determinante da capacidade de suporte de carga do solo. Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação, mas, à medida que ele vai umedecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados do solo, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo, diminuindo a resistência do solo à compactação. Infelizmente, algumas atividades, como a aplicação de agroquímicos para o combate de pragas e doenças ou a colheita, não permitem que o agricultor

possa utilizar máquinas apenas quando o solo está em condições adequadas quanto ao seu teor de água.

A compactação do solo gerada por uma carga excessiva promove alterações morfológicas das raízes e dos atributos físicos do solo, resultando em raízes com menor comprimento e menor distribuição espacial, levando conseqüentemente, a um menor volume de solo explorado. Isso reduz a taxa de uso de água pelas raízes, que tem uma correlação linear com o peso de matéria seca da parte aérea das plantas (LIPIEC *et al.*, 1993). A compactação do solo pode limitar a taxa de alongamento radicular, ou não permitir bom contato raízes-partículas, reduzindo o desenvolvimento das plantas e, portanto, a produtividade (VEEN *et al.*, 1992).

Pesquisadores têm demonstrado claramente o efeito da compactação nos atributos físicos do solo (SILVA *et al.*, 1994; STONE *et al.*, 2002; TORMENA *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2006ab; TORMENA *et al.*, 2008). A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (TORMENA *et al.*, 2002) e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (SOUZA *et al.*, 2006b). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados (KLEIN e LIBARDI, 2002).

De acordo com Ball *et al.* (1997) e Alakukku *et al.* (2003), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. Way *et al.* (1995) verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego, sendo esse aumento tanto maior quanto maior o número de carregamentos. Wood *et al.* (1993) constataram que, antes do preparo, o tráfego de quatro passadas de uma carreta graneleira provocou decréscimos de até 50% na porosidade e permeabilidade do solo nas profundidades de 0,2-0,4 m, quando comparados com o efeito provocado por uma única passada.

O aumento progressivo das cargas externas, combinadas com a insuflagem inadequada dos rodados, contribui para a degradação das camadas do solo em profundidade, em decorrência do deslizamento causado, geralmente, pelo aumento do cisalhamento na superfície, o que implica no rearranjo das partículas do solo e, conseqüentemente, alterações da estrutura (SILVA *et al.*, 2003).

A compactação do solo cultivado com cana-de-açúcar tem sido considerada um fator que afeta a produtividade, em consequência do elevado nível de mecanização dessa cultura. A subsolagem em áreas de reforma dos canaviais tornou-se uma operação de rotina, com a qual tem ocorrido o agravamento da compactação em profundidade, além de aumentar o custo da produção. Em um estudo desenvolvido por Oliveira *et al.* (1995) avaliando o efeito do cultivo contínuo de cana-de-açúcar em atributos físicos de Latossolo Vermelho, observaram modificações na porosidade do solo promovendo a compactação, com maior efeito na área de 16 anos de plantio que foi desde o início manejada com um alto grau de mecanização.

Conforme Topp *et al.* (1997) e Singer e Ewing (2000), os atributos mais utilizados como indicadores de qualidade física do solo são aqueles que levam em conta a profundidade efetiva de enraizamento, a porosidade total e a distribuição e tamanho dos poros, a distribuição do tamanho das partículas, a densidade do solo, a resistência do solo à penetração das raízes, o intervalo hídrico ótimo, o índice de compressão e a estabilidade dos agregados.

Portanto, é fundamental o estudo de parâmetros que envolvam vários atributos físicos do solo para entender a qualidade física dos solos. Trabalhando no desenvolvimento de um indicador de qualidade física do solo que integrasse aspectos fundamentais com interferência na produção das culturas, Letey (1985) chegou ao conceito de “intervalo hídrico não limitante” (“Non Limiting Water Range”, NLWR), como indicador da qualidade estrutural do solo para produtividade das culturas. Silva *et al.* (1994), com base neste conceito desenvolveram o indicador denominado “Least Limiting Water Range” (LLWR). No Brasil Tormena *et al.* (1998) quantificou o LLWR, e traduziu-o como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Os autores definiram o IHO como sendo o volume de água retido no solo em condições em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração.

O intervalo hídrico ótimo (IHO), tem como limite superior o conteúdo de água na capacidade de campo na tensão de 0,01 MPa (REICHARDT, 1988) ou o conteúdo de água no qual a porosidade de aeração é de 10%; e como limite inferior, o conteúdo de água no ponto de murcha permanente na tensão de 1,5 MPa ou a resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (SILVA *et al.*, 1994). O conteúdo de água na capacidade de campo tem sido aceito como padrão para determinação da resistência do solo à penetração na capacidade de campo, sendo

essencialmente, um ponto de referência para o estabelecimento de valores críticos (BENGOUGH *et al.*, 2001).

Outro atributo que também influencia a resposta dos solos à compactação é o teor de matéria orgânica, caracterizado como um dos fatores responsáveis pela manutenção das condições físicas do solo (DIAS JÚNIOR, 2000; BRAIDA *et al.*, 2008; TAVARES FILHO e RIBON, 2008). O uso de coberturas mortas ou fertilizantes orgânicos que venham a promover a manutenção e o aumento do teor de matéria orgânica no solo são um importante aliado contra o processo de compactação (CAMARGO e ALLEONI, 1997) e, promove melhorias das condições biológicas dos solos agrícolas (VARGAS e SCHOLLES, 1998; BRAIDA *et al.*, 2008).

Estudar os atributos físicos do solo e seu efeito na compactação do solo é de fundamental importância para a cultura de cana-de-açúcar, pois apresenta um tráfego de máquinas excessivo que inevitavelmente vai promover modificações nestes atributos reduzindo o desenvolvimento radicular da cultura e, conseqüentemente trará efeitos negativos na produtividade da cultura.

5.3. Controle de tráfego na mecanização agrícola

O corte mecanizado representa a melhor opção para a colheita de cana-de-açúcar, tanto do ponto de vista ergonômico quanto econômico e principalmente, do ponto de vista ambiental, já que apenas o corte mecânico viabiliza a colheita da cana sem queima prévia, o que por sua vez viabiliza o aproveitamento energético do palhico. Porém, como conseqüência, tem o tráfego da colhedora e do transbordo promovendo maior compactação do solo, um dos fatores que obriga a reforma do canavial a cada 5 anos no máximo.

Embora tenham ocorrido melhorias nas sementes, nos fertilizantes, nos defensivos agrícolas e outras práticas agrícolas contribuindo para um aumento significativo na produtividade durante o último século, a mecanização também promoveu contribuições para o aumento da produtividade. Por exemplo, os rendimentos médios do trigo no Reino Unido aumentaram 187% de 1947 para 1991, sendo que uma proporção significativa desse aumento está relacionada diretamente com a mecanização extensiva das áreas agrícolas (SEWELL e YULE, 1996).

A movimentação de máquinas agrícolas pode ocasionar compactação superficial dos solos, que, ao limitar o desenvolvimento radicular, compromete o crescimento e a produtividade das plantas quando estas dependem somente da chuva para suprir suas necessidades, principalmente quando ocorre precipitação pluvial irregular (GUIMARÃES e MOREIRA, 2001). Em tais condições, as plantas esgotam rapidamente as reservas hídricas disponíveis no solo, podendo ocorrer severa deficiência hídrica na planta (BARTON *et al.*, 1966).

O cultivo da cana-de-açúcar envolve o uso de máquinas agrícolas em todas as etapas, desde o preparo do solo até a colheita. Este tráfego de equipamentos pesados sobre o solo pode levar à compactação no perfil, com conseqüentes efeitos negativos nos atributos físicos do solo e no desenvolvimento de raízes (SOUZA *et al.*, 2005). O sistema radicular, por sua vez, pode permanecer ativo por um longo período de tempo depois do corte da planta, deixando de funcionar gradualmente, à medida que um sistema novo se forma, ao crescerem os perfilhos da soqueira.

O conceito atual de agricultura mecanizada baseia-se no trator agrícola, cuja bitola é menor que 2,0 m e, que trafega no terreno nas sucessivas operações de subsolagem, gradagem, plantio, tratos culturais, transbordo e recuperação do palhicho. A mecanização tem evoluído no sentido de máquinas mais pesadas e com maior potência que viabilizam uma utilização do solo mais intensa, sem uma adequada consideração do fator sustentabilidade (MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2007).

Uma solução para diminuir ou evitar a compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas seria a adoção de um sistema de tráfego controlado, ou seja, separar as zonas de tráfego das zonas em que há crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas, assim, uma área menor será atingida, embora mais intensamente. Segundo Trein *et al.* (2005), o sistema de tráfego controlado funciona bem com culturas que são estabelecidas em linha.

Trabalhos realizados na Austrália e nos Estados Unidos mostram que, enquanto culturas estabelecidas em preparo convencional têm até 86% da área trafegada, em semeadura direta, apenas 46% é atingida. Também mostram que, se for utilizado controle de tráfego, apenas 17% da área é atingida pelos pneus, resultando em aumentos de produtividade da ordem de 9 a 16% (LAGUË *et al.*, 2003). Os mesmos autores chamam a atenção para um componente

fundamental para que se tenha sucesso com a adoção deste sistema, que é o uso dos implementos com as mesmas larguras ou em larguras múltiplas. Portanto, deve-se tentar diminuir as áreas trafegadas pelo ajuste das bitolas de todas as máquinas empregadas na produção da cultura.

Estudando a influência do tráfego sobre os níveis de compactação nas entrelinhas de um pomar de macieiras, simulando um tráfego de intensidade correspondente ao ciclo anual da cultura, Draghi *et al.* (2005) identificaram que a alta intensidade de tráfego resultante de numerosas passadas do conjunto trator-implemento comprometeu camadas profundas do perfil para todos os tratamentos.

Avaliando o efeito da posição do tráfego na colheita de cana-de-açúcar, Braunack *et al.* (2006) verificaram redução da compactação e aumento da produtividade da cultura em áreas com preparo direcionado. Os benefícios resultantes de uma menor compactação podem atingir também a produtividade e ganho econômico do produtor. Pesquisas realizadas na Austrália detectaram um aumento de 16% na produtividade e aumento de 30% nos lucros pelo uso do sistema de tráfego controlado quando comparado com o sistema convencional na produção de grãos de sorgo, trigo e milho (TULLBERG, 1997).

Em um estudo de tráfego controlado realizado em solos da Amazônia, Fenner (1999), mostrou que as maiores deformações no solo ocorrem logo após a primeira passagem da máquina, sendo os efeitos das passagens subseqüentes mais reduzidos. A estimativa é que as pressões médias aplicadas aos solos pelas máquinas agrícolas se situam entre 0,05 e 0,3 MPa e que os reboques e caminhões possam exercer pressões entre 0,3 e 0,6 MPa (SILVA *et al.*, 2000).

Além da compactação, o tráfego das máquinas em áreas de cultivo resulta em perda de tração pelos veículos por transitarem em terra solta. Laguë *et al.* (2003) relatam, ainda, que uma das mais importantes causas da baixa eficiência de energia em um sistema de mecanização agrícola convencional é a transmissão de potência mecânica ao solo pela tração. Isto é agravado pelo fato das máquinas transitarem em áreas de cultivo onde o solo está solto implicando também em menor eficiência de tração.

Desta forma, nota-se que as condições ideais de solo para o tráfego das máquinas é inversamente daquela necessária ao desenvolvimento das culturas (MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2007). Uma forma muito útil de limitar a compactação do solo é a separação

das áreas usadas para crescimento da raiz das usadas para tráfego de veículo, segundo Raper (2005) e Trein *et al.* (2005), esse processo de cultivo denomina-se tráfego controlado.

O tráfego controlado é definido por, Laguë *et al.* (2003), como um sistema de produção no qual a área de cultivo e as pistas de tráfego são distintas e permanentemente separadas. Dessa forma, as pistas de tráfego são propositalmente compactadas e podem resistir ao tráfego adicional sem se deformar, assim a eficiência de tração dos pneus aumenta. Por sua vez, as áreas de produção entre as pistas são usadas exclusivamente para o plantio não sofrendo compactação pelo tráfego de veículos. Assim, a compactação é virtualmente eliminada, com exceção da compactação natural do solo e da provocada pelos implementos agrícolas, a qual fica, entretanto, minimizada no sistema de tráfego controlado. Outro benefício potencial do sistema de tráfego controlado é a eliminação da necessidade de tratores de grande potência necessários às operações pesadas de cultivo, tais como subsolagem e aração.

A utilização do sistema de tráfego controlado representa uma alternativa interessante ao cultivo mecanizado convencional, visto que há uma redução total ou quase total na frequência de máquinas sobre a área de plantio (RICHART *et al.*, 2005; TREIN *et al.*, 2005; MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2007). Alguns dos principais benefícios do controle do tráfego estão associados com a redução da compactação e com diversos benefícios econômicos e agronômicos. A energia e os custos com combustível podem ser reduzidos devido à tração aumentada da roda em áreas trafegadas e na força reduzida dos implementos agrícolas nas áreas não trafegadas. O controle de tráfego também pode eliminar a sobreposição da aplicação da semente, do fertilizante e do produto químico, reduzindo o custo e o impacto ambiental (MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2007).

O tráfego necessário para viabilizar o sistema atual de colheita de colmos e palhço demanda de um sistema de plantio com preparo do solo convencional em contraposição ao sistema de plantio direto, que mostrou resultados positivos já consolidados em outras culturas mais extensivas como soja, milho e trigo que estão adotando o plantio direto como recurso para reduzir custos e aumentar a sustentabilidade (MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2007).

Quando manejado de forma apropriada, o controle de tráfego pode resultar em menos de 15% da superfície do solo afetada por rodas de máquinas e equipamentos. Previne a compactação mecânica e diminui a resistência do solo à penetração, propiciando condições para o crescimento de raízes, a infiltração de água e a aeração do solo. Isso resulta em ambiente

ideal para o desenvolvimento das plantas. Existem dados de experimentos mostrando que podem ser esperados aumentos de 15% na produção, com agricultores relatando aumentos de até 25% com a adoção de sistemas de controle de tráfego em lavouras (TULLBERG, 2000).

Analisando-se os objetivos e a forma como são realizados os trabalhos que visam avaliar a influência do tráfego de máquinas nos solos brasileiros, Silva *et al.* (2003) perceberam que a maioria deles são feitos em uma condição estática e quase sempre voltada à obtenção de um resultado qualitativo e comparativo, cujas variáveis normalmente avaliadas são a densidade do solo e a porosidade do solo. Neste caso, três ponderações podem ser feitas: 1) que as operações agrícolas ocorrem de forma dinâmica, 2) que a densidade do solo e a porosidade do solo são fortemente dependentes do manejo e, 3) que quase sempre são desconsideradas informações, tais como o tipo de pneu, pressão de inflação, pressão de contato, umidade do solo, profundidade de trabalho e especificações técnicas dos implementos utilizados.

Considerando que o desenvolvimento do setor sucro-alcooleiro ocorra ou deva ocorrer de maneira sustentável são importantes estudos com direcionamento do tráfego e/ou aumento da bitola, o qual permitirá redução da compactação e melhorias na qualidade física do solo, bem como a identificação e a quantificação dos efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo, de tal maneira que seja possível adaptar as atividades de forma condizente com o desenvolvimento sustentável para o setor. Em cultivos altamente tecnificados, como no caso da cana-de-açúcar, é fundamental ter o conhecimento desta nova forma de manejo com controle de tráfego, o que poderá contribuir para a redução de custos nos sistemas de produção.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1. Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi realizado na Usina São Martinho, município de Pradópolis, SP (21°18'67" de latitude sul e 48°11'38" de longitude oeste, com 630 m de altitude). O clima é o mesotérmico de inverno seco (Cwa), pelo critério de classificação climática de Köppen. A área (Figura 1) é de topografia plana e o solo foi classificado como sendo um Latossolo Vermelho distrófico típico álico, textura argilosa A moderado, segundo EMBRAPA (2006).

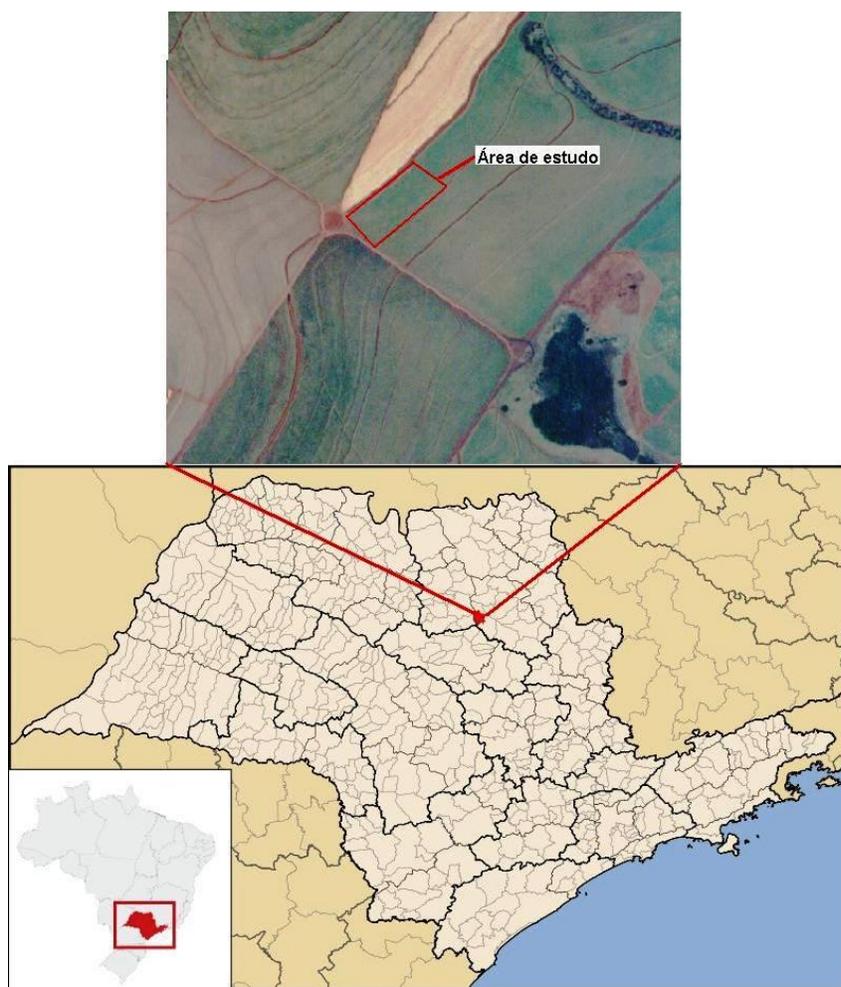


Figura 1. Localização da área de estudo no estado de São Paulo com destaque em foto aérea.

6.2. Aspectos do controle de tráfego na área da pesquisa

A Usina São Martinho, trabalha atualmente no aumento da colheita mecanizada nas áreas próprias e arrendadas, na qual 92% são colhidos mecanicamente e, de toda cana moída na usina 82,2% é proveniente da colheita mecânica (100% picada e sem queima). A não totalização da mecanização em áreas próprias e arrendadas é devido aos impedimentos físicos, como declividade e principalmente presença de pedras, encontradas nos 7,8% restantes da área.

Em 1995 a Usina São Martinho iniciou a adoção de técnicas de controle de tráfego, para evitar o pisoteio da soqueira, assumindo a necessidade do duplo tráfego (colhedora e transbordo), mas que o rodado das máquinas se mantivesse distante da linha das soqueiras.

Nas áreas colhidas pela usina, foi adotado o controle de tráfego seguindo um método criado pela usina denominado de “canteirização” das linhas de cana, plantada por meio de um projeto chamado “viva a cana”, no qual vários procedimentos operacionais, disciplinares e até modificações de equipamentos, com aumento da bitola dos tratores para 3,0 m foram implantados com o objetivo de manter intacto 0,80 m de largura do chamado “canteiro da cana” (Figura 2). Ou seja, 0,40 m de cada lado do centro da linha de cana são preservados (sem marcas de pneus) durante todos os cortes desde o plantio.



Figura 2. Trator com bitola estendida e esquematização da área, sendo (LP) linha de plantio e (R) eixo do rodado do trator.

Outra forma de controle de tráfego empregado pela Usina São Martinho é o sistema de orientação de GPS para veículos agrícolas (piloto automático, Figura 3). Existem vários tipos de sistema de orientação para veículos agrícolas, mas todos com o objetivo comum de ajudar a dirigir o veículo com mais eficácia reduzindo falhas do operador e sobreposição no campo.



Figura 3. Imagens do sistema de piloto automático.

O sistema de direção assistida (piloto automático - Figuras 3a, 3b e 3c) está em fase inicial de implantação na usina, porém, a unidade possui um projeto piloto, onde dois tratores e duas colhedoras já operam com o sistema de orientação GPS desde a safra de 2006/2007. O sistema está sendo usado nas operações de sulcação, plantio e colheita e, foram utilizados neste experimento.

6.3. Parcelas Experimentais

O trabalho de pesquisa foi conduzido em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), dividida em 12 parcelas, tendo cada uma delas, quatorze linhas de plantio espaçadas em 1,5 m, totalizando 21 m de largura e 50 m de comprimento, com bordadura de 2,0 m no entorno da área (Figura 4).

A área foi plantada no ano de 2007 com a primeira colheita chamada de cana planta ou primeiro corte, ocorrida em 2008 e o segundo corte no ano seguinte. Foi realizada calagem na área, com calcário dolomítico 32% ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$). A área recebeu adubação mineral (nitrato 310 kg ha^{-1}) e orgânica (vinhaça $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) após o plantio. No plantio, foram ainda aplicadas 20 t ha^{-1} de torta de filtro (resíduo do processo industrial da usina sucro-alcooleira).

Os tratamentos em estudo foram os seguintes:

1- cana-de-açúcar com colheita mecanizada tradicional (sistema de cana crua sem controle de tráfego, operadores das máquinas orientados a realizar os serviços como faziam antes dos procedimentos de controle de tráfego), chamado de TESTEMUNHA (T);

2- cana-de-açúcar com corte mecanizado e com controle de tráfego (sistema de cana crua com controle de tráfego utilizando o aumento de bitola para 3,0 m), chamado de CONTROLE DE TRÁFEGO (CT);

3- cana-de-açúcar com corte mecanizado e com controle de tráfego (sistema de cana crua com controle de tráfego utilizando o aumento de bitola para 3,0 m e piloto automático), chamado de PILOTO AUTOMÁTICO (PA).

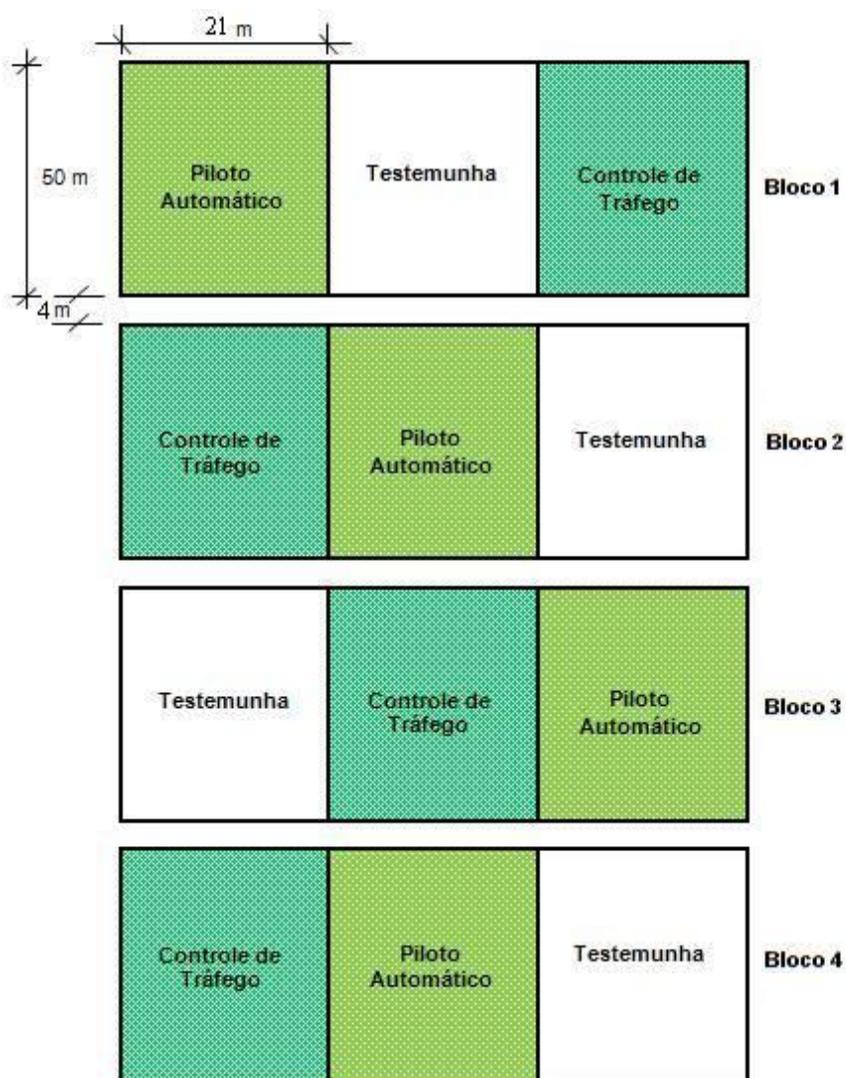


Figura 4. Croqui da área experimental.

6.4. Coleta das amostras de solo

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para determinação dos atributos físicos do solo. Com a abertura de trincheiras no sentido perpendicular às linhas de plantio, as amostras foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Além da busca do efeito da compactação na profundidade, também foram feitas coletas em três diferentes pontos, sendo uma no centro entre duas linhas de plantio, local no qual o eixo do rodado do trator deveria trafegar (chamado de R), uma na linha de plantio (chamado de LP) e outra à metade da distância entre as duas anteriores, entrerrodado (chamado de ER), Figura 5.

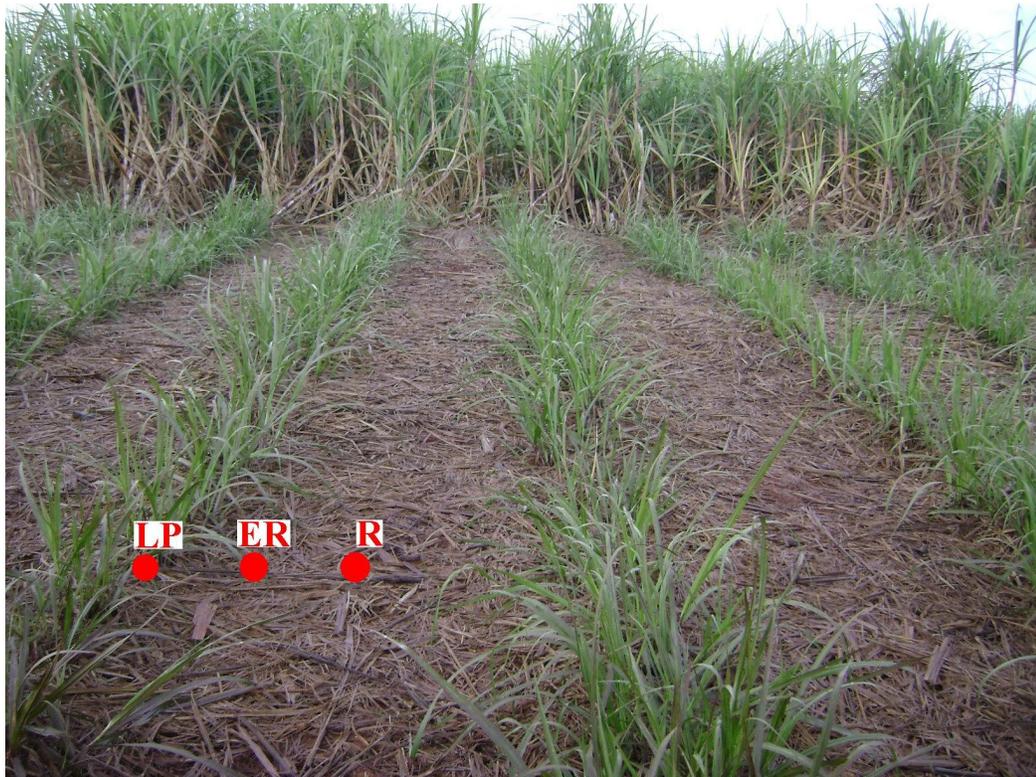


Figura 5. Área do experimento com a indicação dos pontos de coleta.

Três trincheiras por parcela foram abertas aleatoriamente, com coleta de amostras em três profundidades em cada ponto de coleta, totalizando 9 amostras por trincheira, desta forma

obtendo-se 27 amostras por parcela; como cada tratamento foi replicado 4 vezes (blocos) foram obtidas 108 amostras por tratamento, totalizando-se 324 amostras.

6.5. Caracterização física do solo

a) Análise granulométrica – foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação em mesa agitadora de baixa rotação seguindo-se metodologia proposta por Camargo *et al.* (1986).

b) Densidade do solo e porosidade do solo – amostras indeformadas foram coletadas pelo método tradicional (capela ou castelo) com anéis volumétricos de 0,04 m de altura e 0,05 m de diâmetro. A microporosidade foi determinada em mesa de tensão e correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa, após saturação (EMBRAPA, 1997). A porosidade total e a densidade do solo foram obtidas após secagem da amostra em estufa a 105°C segundo Embrapa (1997) e, a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

c) Curva de retenção – foi obtida em câmaras de pressão de Richards. Os anéis com as amostras indeformadas foram submetidos às pressões de 0,002, 0,006, 0,01, 0,033, 0,05, 0,075, 0,1, 0,3 e 0,5 MPa. Depois de submetidos à determinada pressões foram pesados para obtenção da quantidade de água contida no solo nesta pressão, sendo novamente saturados e retornando para a câmara de Richards para a próxima pressão. De posse das quantidades de água em cada pressão, a curva de retenção de água foi ajustada. Para o ajuste das curvas de retenção de água no solo foi utilizado o programa SWRC (Soil Water Retention Curves), desenvolvido por Dourado Neto *et al.* (2000), com base na metodologia de van Genuchten (1980).

d) Estabilidade de agregados e teor de matéria orgânica – a estabilidade de agregados foi medida pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), no qual os agregados foram obtidos mediante manipulação com as mãos, aplicando força de tração, sendo usados para peneiramento em água os agregados que passaram na peneira de 9,52 mm e ficaram retidos na de 4,76 mm. Após secagem ao ar, os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,76 mm por dez minutos. Para peneiramento dos agregados em água, foram utilizadas as peneiras com diâmetros de malha 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, separando os agregados nas seguintes classes: C₁ (9,52-4,76 mm), C₂ (4,76-2,0 mm), C₃ (2,0-1,0 mm), C₄

(1,0-0,5 mm), C₅ (0,5-0,25 mm) e C₆ (< 0,25 mm). Após a obtenção das classes de agregados calculou-se o diâmetro médio das partículas (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e a porcentagem de agregados > 2,0 mm. O teor de matéria orgânica foi obtido por meio da metodologia proposta pela Embrapa (1997).

e) Teor de água no solo e resistência do solo à penetração – o teor de água no solo foi obtido pelo método gravimétrico em amostras deformadas (EMBRAPA, 1997). Para determinação da resistência do solo à penetração, foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30⁰. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida pela fórmula de Stolf (1991), a seguir:

$$R = \frac{g}{A} \left[1 + \frac{h}{x} \left(\frac{M}{M+m} \right)^2 \right] \quad (1)$$

em que, R é a resistência do solo à penetração, kgf cm⁻² (kgf cm⁻² * 0,098 = MPa); M a massa do êmbolo, 4 kg (Mg – 4 kgf); m a massa do aparelho sem êmbolo, 3,2 kg (mg – 3,2 kgf); h a altura de queda do êmbolo, 40 cm; x a penetração da haste do aparelho, cm/impacto, e A a área do cone, 1,29 cm².

6.6. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foi utilizado o método descrito por Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1998). A porosidade de aeração (PA) mínima de 0,10 m³ m⁻³ foi obtida pela subtração de 0,10 m³ m⁻³ da porosidade total; a umidade do solo no ponto de murcha permanente (PMP) na tensão de 1,5 MPa; a umidade do solo na capacidade de campo (CC) na tensão de 0,006 MPa; e a umidade do solo para cada densidade do solo na qual se atinge a resistência do solo à penetração (RP) de 2,0 MPa. A PA, a CC e o PMP tiveram seus valores linearizados de acordo com a densidade do solo.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada em laboratório nas amostras coletadas com os cilindros volumétricos, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de 0,0005 mm s⁻¹, equipado com uma célula de

carga de 200 N, haste com cone de 0,003 m de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento. As determinações foram realizadas em amostras indeformadas submetidas a diferentes tensões de água no solo (0; 0,006; 0,01; 0,033; 0,05; 0,1; 0,2 e 1,5 MPa). Para cada amostra foram obtidos 96 valores, eliminando-se os valores iniciais e finais, considerando-se apenas os 0,03 m centrais do cilindro de 0,05 m. Os valores de resistência do solo à penetração foram ajustados a um modelo não-linear proposto por Leão e Silva (2004), que correlaciona a resistência do solo à penetração com a densidade e umidade do solo.

Foram retiradas 24 amostras em cada tratamento nas profundidades de 0,00-0,20 m, dos locais R (eixo do rodado), ER (entrerrodado) e LP (linha de plantio), de maneira alternada, buscando-se a maior variedade de densidade do solo possível.

Com o gráfico do intervalo hídrico ótimo para cada tratamento, foi possível qualificar a condição física do solo para o crescimento de plantas em cada um dos tratamentos (T, CT e PA) estudados, analisando a distribuição dos valores de densidade do solo, tomando por base a amplitude de variação da densidade empregada na caracterização do IHO.

6.7. Produtividade da cultura de cana-de-açúcar

Cada conjunto de transbordo utilizado no ensaio foi pesado, com a utilização de balança digital da marca Digi-Tron (capacidade máxima de 20.000 kg com erro de 5 kg), inicialmente vazio para se obter a tara (Figura 6). O conjunto depois de preenchido com cana foi novamente pesado. Para cada pesagem foi registrado o peso do trator e dos três transbordos. O peso do trator foi utilizado com o intuito de eliminar possíveis erros devido à transferência de peso entre os veículos. Conhecendo-se a tara de cada conjunto e o seu peso depois de cheio, foi possível calcular o peso de cana-de-açúcar colhido para cada parcela. Isto permitiu efetuar comparações estatísticas quanto a produtividade entre os 3 tratamentos.



Figura 6. Transbordo sobre a balança para pesagem a campo.

6.8. Análises estatísticas

O experimento teve os tratamentos em esquema de sub-sub parcelas (parcela = tratamento; sub = ponto de coleta; sub-sub = profundidade). Em cada cruzamento de tratamento x ponto de coleta x profundidade foram abertas 03 trincheiras (03 replicações), totalizando 324 observações.

O trabalho foi realizado dentro de um experimento trifatorial (tratamentos x pontos de coleta x profundidade) com parcelas divididas no delineamento em blocos ao acaso com 4 repetições – subparcelas nos locais e subsubparcelas em profundidade.

Casualização: os “a=3” níveis do fator tratamento são casualizados nas “a (3)” parcelas principais, separadamente dentro de cada bloco (b=4), os “c=3” níveis do fator ponto de coleta são avaliados em cada subdivisão (subparcelas) de cada parcela principal (tratamentos) e os “d=3” níveis do fator profundidade são avaliadas em profundidades diferentes em cada subparcela com 3 replicações (trincheiras) totalizando 324 observações (Tabela 1). As análises foram processadas com o uso do software estatístico SAS versão 8.

Tabela 1. Quadro de variância do experimento.

Causa da Variação	Graus de Liberdade
Bloco	$b - 1 = 3$
Tratamento	$a - 1 = 2$
Erro (a)	$(b - 1) (a - 1) = 6$
Ponto de Coleta	$(c - 1) = 2$
Ponto de Coleta x Tratamento	$(c - 1) (a - 1) = 4$
Erro (b)	$a(c - 1) (b - 1) = 18$
Profundidade (d)	$(d - 1) = 2$
Profundidade x Tratamento	$(d - 1) (a - 1) = 4$
Profundidade x Ponto de Coleta	$(d - 1) (c - 1) = 4$
Profundidade x Ponto de Coleta x Tratamento	$(d - 1) (c - 1) (a - 1) = 8$
Erro (c)	Diferença = 270
Total	323

6.9. Condições de campo

Dentre os itens observados a campo salienta-se a elevada quantidade de resíduos vegetais da cultura de cana-de-açúcar (ponta da planta e folhas); o que vêm de encontro com os preceitos do plantio direto, e como tal, mantém o solo protegido inclusive da aplicação de cargas do maquinário, funcionando como um amortecedor natural do peso das máquinas sobre o solo, conforme encontrado por Braidá *et al.*(2008) (Figura 7).



Figura 7. Proteção do solo pela palhada no sistema de cana crua.

Observaram-se as grandes dimensões dos maquinários envolvidos, mas pode-se perceber a preocupação do setor com o uso de pneus de alta flutuação nos transbordos, procurando-se reduzir os efeitos da compactação (Figuras 8 e 9). O trator utilizado na tração dos transbordos, modelo 240 da Case, com 240 cv (176 kW) de potência, possui 10.650 kg de peso distribuídos em dois pneus dianteiros R30 e dois pneus traseiros R38.



Figura 8. Trator com os transbordos acoplados.



a - Pneu do transbordo – Trelleborg Twin 404 600/50– 22.5.



b - Pneu do transbordo – Michelin Cargo X BIB 600/50 R22.5.

Figuras 9. Pneus de alta flutuação para redução da compactação.

A colhedora de cana de açúcar, modelo 7700 da Case, com 335 cv (246 kW) de potência, possui 18.500 kg de peso distribuídos em, duas esteiras. Os transbordos, com peso médio de 8.000 kg, distribuídos em quatro pneus de alta flutuação, têm a capacidade para carregar até 10.000 kg de cana-de-açúcar.

A área experimental é uniforme e, não se percebe diferenças entre os manejos visualmente. O plantio em linha permitiu uma clara delimitação das parcelas após as colheitas (Figura 10), e delimitação da abertura das trincheiras de modo que os pontos de coleta LP, ER e R fossem visualizados no campo facilitando a abertura das trincheiras.



Figura 10. Área do experimento após a colheita.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Análise granulométrica

Nos diferentes manejos estudados não ocorreu diferença significativa para o teor de argila, sendo que os menores teores foram observados nas profundidades de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m diferindo da profundidade de 0,20-30 m (Tabela 2). Os teores de silte e areia não apresentaram diferença nos sistemas de manejo da cana-de-açúcar, porém, apresentaram diferença em profundidade, cujos menores valores ocorreram na profundidade de 0,20-0,30 m. O solo da área de estudo apresenta textura argilosa (EMBRAPA, 2006). A relação silte/argila indica que o solo das parcelas experimentais são bastante intemperizados, pois apresenta um valor para este atributo abaixo de 0,7 em latossolo.

Tabela 2. Atributos granulométricos e relação silte/argila para os manejos controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Sistema de Manejo	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	-----Argila (g kg ⁻¹)-----			-----Silte (g kg ⁻¹)-----		
CT	509 Aa	536 Aa	581 Ab	314 Aa	291 Aa	285 Aa
PA	575 Ba	574 Aa	578 Aa	284 Aa	304 Aa	304 Aa
T	517 Aa	554 Aa	585 Ab	332 Aa	298 Aa	275 Ab
	-----Areia (g kg ⁻¹)-----			----Relação silte/argila (kg dm ⁻³)----		
CT	175 Aa	172 Aa	132 Ab	0,62 Aa	0,54 Aa	0,49 Ab
PA	139 Aa	120 Ba	117 Aa	0,49 Ba	0,53 Aa	0,53 Aa
T	149 Aa	146 Aa	139 Aa	0,64 Aa	0,54 Aa	0,47 Ab

Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A não diferença da granulometria entre os tratamentos estudados possibilita uma maior confiabilidade nos resultados, uma vez que a granulometria do solo tem forte influência nos atributos físicos do solo, não havendo interferência desta variável nas parcelas experimentais. A resistência e a resiliência (deformação elástica ou recuperável) do solo a

determinada prática agrícola depende da textura e da mineralogia do solo. O teor e o tipo de argila também afetam o funcionamento compressivo do solo, determinando, portanto, a profundidade de transmissão e a persistência da compactação.

7.2. Interação manejo e profundidade – anos de 2008 e 2009

Constatou-se uma diminuição dos teores de matéria orgânica em profundidade para os anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Esta redução mostrou-se mais acentuada da camada 0,00-0,10 m para a camada de 0,20-0,30 m, devido a maior deposição superficial de resíduos vegetais, o que também foi constatado por Souza e Alves (2003), bem como pela natureza superficial das raízes da maioria dos vegetais, que condicionam um teor mais elevado de matéria orgânica na superfície (CASTRO FILHO *et al.*, 1998). A diminuição do teor de matéria orgânica nos cultivos contínuos pode ser atribuída à decomposição da matéria orgânica humificada em virtude do baixo retorno dos resíduos vegetais ao solo e o revolvimento excessivo do solo.

O teor de matéria orgânica apresentou diferença significativa entre os sistemas de manejo da cana-de-açúcar estudados, com os maiores teores para o sistema de controle de tráfego e piloto automático, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Os resultados obtidos corroboram com os determinados por Souza *et al.* (2005), os quais verificaram que o sistema de cana colhida mecanicamente diferiu dos tratamentos com queima da cana estudados em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. No tratamento com cana colhida mecanicamente (cana crua), a adição de matéria orgânica na forma de palha (folhas e pontas) foi em média de 15 t ha⁻¹ neste experimento. Segundo Shinitzer (1991), o material em decomposição origina uma série de compostos orgânicos, como açúcares, aminoácidos, ceras, fenóis, ligninas e ácidos, os quais contribuem para o aumento do teor de matéria orgânica. Mendonza *et al.* (2000) em um Argissolo Amarelo, verificaram na profundidade de 0,00-0,10 m, um aumento na fração humina e ácidos fúlvicos na matéria orgânica no sistema de cana crua, os quais são importantes na agregação do solo.

Tabela 3. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para os sistemas de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, no ano de 2008.

Sistema de Manejo	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	-----Densidade do solo (kg dm ⁻³)-----			-----Porosidade total (m ³ m ⁻³)-----		
CT	1,05 Aa	1,14 Ab	1,21 Ab	0,51 Aa	0,50 Aa	0,53 Aa
PA	1,09 Aa	1,14 Aab	1,19 Ab	0,54 Aa	0,50 Ab	0,53 Aab
T	1,10 Aa	1,18 Ab	1,21 Ab	0,55 Aa	0,51 Ab	0,52 Aab
	-----Macroporosidade (m ³ m ⁻³)-----			-----Microporosidade (m ³ m ⁻³)-----		
CT	0,11 Aa	0,10 Aa	0,10 Aa	0,41 Aa	0,40 Aa	0,43 Aa
PA	0,11 Aa	0,09 Aa	0,10 Aa	0,43 Aa	0,40 Aa	0,42 Aa
T	0,11 Aa	0,08 Aa	0,10 Aa	0,44 Aa	0,43 Aa	0,42 Aa
	-----Teor de água no solo (g g ⁻¹)-----			-----Resistência do solo (MPa)-----		
CT	0,18 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa	1,25 Aa	3,52 Aab	5,06 Ab
PA	0,17 Aa	0,17 Aa	0,18 Aa	1,89 Aa	3,63 Aab	4,70 Ab
T	0,19 Aa	0,20 Aa	0,20 Aa	1,88 Aa	5,34 Ab	5,22 Ab
	-----Matéria orgânica (g kg ⁻¹)-----			-----Diâmetro médio ponderado (mm)-----		
CT	30,20 Aa	24,60 Aa	15,10 Ab	2,92 Aa	2,16 Ab	1,77 Ac
PA	22,10 Aa	17,30 Aa	11,30 Ab	3,06 Aa	2,39 Ab	1,96 Ac
T	17,70 Ba	12,20 Ba	9,30 Bb	3,02 Aa	2,36 Ab	1,77 Ac
	-----Diâmetro médio geométrico (mm)-----			-----Agregados > 2,0 mm (%)-----		
CT	2,12 Aa	1,39 Ab	1,08 Ab	61,50 Aa	40,30 Ab	30,10 Ac
PA	2,28 Aa	1,59 Ab	1,20 Ac	65,90 Aa	46,30 Ab	35,30 Ac
T	2,22 Aa	1,54 Ab	1,01 Ac	64,80 Aa	45,90 Ab	30,00 Ac

Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que não houve diferença significativa para a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade do solo nos sistemas de manejo estudados, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Em profundidade não foi verificado diferença entre os sistemas de manejo da cana-de-açúcar para o ano de 2009, demonstrando que os sistemas de controle de tráfego e

piloto automático não promoveram melhoria na qualidade física do solo. Tais resultados são concordantes com os obtidos por Assis e Lanças (2005), os quais verificaram que o sistema plantio direto com 1, 4 e 5 anos de implantação apresentou valores dos atributos físicos do solo (porosidade e agregação) semelhantes ao sistema de preparo convencional em um Nitossolo Vermelho distroférico. Somente o tratamento com 12 anos de plantio direto apresentou estes atributos mais próximos dos valores da área de mata nativa. Discordando dos resultados obtidos por Souza *et al.* (2005), os quais verificaram que o sistema de cana colhida mecanicamente apresentou menor densidade e maior porosidade do solo.

Segundo Arshad *et al.* (1996), valores acima de $1,40 \text{ kg m}^{-3}$ restringem o crescimento radicular em solo argiloso, portanto, os tratamentos em estudo não apresentaram densidade restritiva ao crescimento radicular (Tabela 4). Vasconcelos e Dinardo-Miranda (2006) estudando o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção, verificaram valores de densidade do solo de $1,45 \text{ kg m}^{-3}$ em latossolo com teor de argila em torno de 400 a 600 g kg^{-1} . Os autores afirmam que este valor de densidade do solo é muito alto e restringe o desenvolvimento do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar na profundidade de 0,10-0,30 m. Para o ano de 2008 observa-se que o valor da densidade do solo na profundidade superficial foi menor que o ano de 2009, este resultado se deveu ao menor tráfego de máquina na superfície em 2008.

Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar apresentaram densidade crescente em profundidade até a profundidade de 0,30 m, confirmando os estudos de Hakansson e Voorhees (1997), os quais verificaram que, em sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas pesadas, ocorre compactação do solo até 0,4 m. O aumento da densidade do solo até a profundidade de 0,40 m deve-se ao tráfego de máquinas pesadas durante o plantio e a colheita. Os valores de densidade do solo na profundidade superficial são coerentes com o maior tráfego de máquinas na colheita, confirmando os estudos de Hartemink (1998). Silva *et al.* (2000) afirmaram que, com a modernização da agricultura, o peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado, processo esse que não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e da largura dos pneus, resultando em maior risco à compactação do solo e redução da produtividade das culturas.

Tabela 4. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para os sistemas de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, no ano de 2009.

Sistema de Manejo	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	-----Densidade do solo (kg dm ⁻³)-----			-----Porosidade total (m ³ m ⁻³)-----		
CT	1,25 Aa	1,28 Aa	1,27 Aa	0,55 Aa	0,54 Aa	0,54 Aa
PA	1,26 Aa	1,22 Aa	1,25 Aa	0,55 Aa	0,62 Aa	0,54 Aa
T	1,24 Aa	1,23 Aa	1,26 Aa	0,56 Aa	0,56 Aa	0,55 Aa
	-----Macroporosidade (m ³ m ⁻³)-----			-----Microporosidade (m ³ m ⁻³)-----		
CT	0,06 Aa	0,05 Aa	0,05 Aa	0,50 Aa	0,50 Aa	0,50 Aa
PA	0,05 Aa	0,06 Aa	0,06 Aa	0,50 Aa	0,56 Aa	0,48 Aa
T	0,04 Aa	0,05 Aa	0,05 Aa	0,52 Aa	0,51 Aa	0,50 Aa
	-----Teor de água no solo (g g ⁻¹)-----			-----Resistência do solo (MPa)-----		
CT	0,17 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	1,31 Aa	2,54 Ab	2,76 Ac
PA	0,16 Aa	0,17 Aa	0,18 Aa	1,46 Aa	2,74 Ab	3,06 Ac
T	0,18 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	1,47 Aa	2,85 Ab	3,09 Ac
	-----Matéria orgânica (g kg ⁻¹)-----			--Diâmetro médio ponderado (mm)--		
CT	34,70 Aa	28,70 Aa	17,30 Ab	2,14 Aa	1,71 Ab	1,29 Ac
PA	24,30 Aa	17,30 Aa	12,70 Ab	2,05 Aa	1,77 Aa	1,37 Ab
T	21,00 Ba	15,00 Ba	10,30 Bb	2,08 Aa	1,90 Aa	1,37 Ab
	-Diâmetro médio geométrico (mm)-			-----Agregados > 2,0 mm (%)-----		
CT	1,32 Aa	1,00 Ab	0,71 Ac	39,60 Aa	27,70 Ab	17,70 Ac
PA	1,27 Aa	1,03 Aa	0,75 Ab	37,30 Aa	29,90 Aa	20,40 Ab
T	1,40 Aa	1,16 Aa	0,80 Ab	39,40 Aa	33,20 Aa	20,10 Ab

Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O espaço poroso do solo nos tratamentos estudados é composto predominantemente por microporos (Tabelas 3 e 4). A proporção ideal da distribuição de poros por tamanho, segundo Kiehl (1979) é de 2:1 (micro/macroporo), garantindo suficiente aeração, permeabilidade e capacidade de retenção de água. A porosidade total nos sistemas de manejo

estudados esteve acima de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para todos os tratamentos, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. Segundo Camargo e Alleoni (1997), um solo ideal deve apresentar $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de volume de poros que, na capacidade de campo, teria $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocupado pela água e $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocupado pelo ar. A relação micro/macroporo medida neste estudo foi de 10:1 para o ano de 2009, demonstrando a diminuição da condição física do solo pela passagem dos maquinários.

Nos diferentes sistemas de manejo avaliados no ano de 2009, verificaram-se que todos os tratamentos apresentaram valores de macroporosidade do solo, em todas as profundidades, inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabelas 3 e 4), o qual é considerado como valor mínimo de porosidade de aeração necessário ao desenvolvimento do sistema radicular (GUPTA e ALLMARAS, 1987). Em 2008 ocorreram valores de macroporosidade próximos do limite crítico, os quais devido ao tráfego de máquinas agrícolas na superfície do solo passaram a condição de críticos em 2009. Neste contexto, Carvalho *et al.* (1991) afirmaram que a macroporosidade é a mais afetada pelo cultivo contínuo de cana-de-açúcar. Souza *et al.* (2006b) avaliando a micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos, em um Latossolo Vermelho eutrófico, verificaram que o cultivo intensivo da cultura de cana-de-açúcar reduz significativamente a porosidade do solo, com maior evidência na macroporosidade.

Não houve diferença significativa entre os sistemas de manejo da cana-de-açúcar nas profundidades estudadas para a microporosidade, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Resultados semelhantes foram observados por Carvalho *et al.* (1991) e Souza *et al.* (2005) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Segundo Silva e Kay (1997) a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura e pelo teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo, originada pelo tráfego de máquinas, implementos entre outros.

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentados os valores do teor de água no solo determinados no momento da realização da resistência do solo à penetração, nos anos de 2008 e 2009. Os resultados da análise da variância aplicada aos teores de água no solo não mostram diferença significativa para os tratamentos e profundidades estudadas. Observa-se que os valores do teor de água no solo nas profundidades estudadas variaram entre 0,18 a $0,20 \text{ g g}^{-1}$. Segundo Torres

e Saraiva (1999) a faixa de friabilidade é a indicada para detectar as possíveis diferenças na avaliação da resistência do solo à penetração.

A resistência do solo à penetração é extremamente dependente do conteúdo de água no solo, com relação inversa, conforme demonstrado por Imhoff *et al.* (2001). Assim, pode-se inferir que, se os três sistemas estivessem com o mesmo conteúdo de água no solo, o sistema com controle de tráfego apresentaria valores inferiores aos demais sistemas, devido ao maior teor de matéria orgânica que apresenta alta capacidade de retenção de água. Mas, como as determinações foram realizadas na mesma data, deve-se, inicialmente, destacar o efeito dos restos culturais sobre a estrutura do solo e, conseqüentemente, maior conteúdo de água no solo, conforme mencionado por Spera *et al.* (2000).

Adotando o valor de 2,0 MPa como resistência do solo à penetração crítica ao desenvolvimento radicular na consistência friável (TORRES e SARAIVA, 1999), os resultados indicam que nas áreas com os diferentes tratamentos estudados, nas profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, apresentam valores superiores, indicando possíveis restrições à penetração de raízes, em períodos de déficit hídrico a 2 MPa, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Souza *et al.* (2005) estudando os sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, verificaram menor valor de resistência do solo à penetração na profundidade 0,00-0,10 m em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, concordando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Independentemente do sistema de manejo da cana-de-açúcar, houve aumento da resistência do solo à penetração até 0,30 m, confirmando os dados de Silva *et al.* (2000), que avaliaram a resistência mecânica do solo à penetração pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho. Houve aumento da resistência à penetração da profundidade de 0,10-0,20 m para 0,20-0,30 m, com valores considerados restritivos ao desenvolvimento radicular (Tabelas 3 e 4). Arshad *et al.* (1996) afirmam que valores entre 2,0 e 4,0 MPa dificultam o desenvolvimento radicular das culturas.

Segundo Grant e Lafond (1993) valores compreendidos entre 1,5 e 3,0 MPa são considerados críticos e dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Dexter (1987) afirmou que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, sendo que em condições de maior conteúdo de água pode haver crescimento radicular em valores de resistência do solo à penetração superior a 4,0 MPa. Segundo Salire *et al.* (1994) e Hakansson e Voorhees (1997),

sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas podem promover compactação em subsuperfície. Valores superiores a 5,0 MPa são admitidos em plantio direto (EHLERS *et al.*, 1983).

Os diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar não apresentaram diferença para o diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e agregados > 2,0 mm, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Ceddia *et al.* (1999) estudando diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nos atributos físicos de um Podzólico Amarelo, no Estado do Espírito Santo, verificaram, após cinco anos, maior DMP no sistema com cana crua em relação ao de cana queimada. É importante mencionar que, apesar de a cana-de-açúcar ser uma gramínea e, segundo Silva e Mielniczuk (1997), as gramíneas proporcionarem maior benefício na agregação, em consequência da maior densidade de raízes, este benefício foi inferior quando comparado aos conteúdos de matéria orgânica.

Nos diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar foram observadas diferenças significativas entre as profundidades estudadas com relação ao DMP, DMG e agregados > 2,0 mm, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Verificou-se uma redução da estabilidade de agregados em profundidade, a qual provavelmente está relacionada com o baixo teor de matéria orgânica, pois este atributo do solo apresenta grande superfície específica e capacidade de troca de cátions, possibilitando maior número de ligações eletrostáticas entre esta e as partículas de solo. Além disso, a sua decomposição por microrganismos resulta na formação de inúmeros compostos importantes na cimentação e estabilização dos agregados (ANGERS, 1992). Da Ros *et al.* (1997), em estudo comparativo entre sistemas de preparo após cinco anos de cultivo, observaram que o DMG dos agregados no tratamento com plantio direto foi equivalente ao do campo nativo.

No preparo com mobilização do solo, o revolvimento do solo para o plantio aumenta o contato do ar com a matéria orgânica, acelerando a sua decomposição, refletindo em seu decréscimo ao longo dos anos e, conseqüentemente diminuindo a estabilidade de agregados, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 3 e 4). Segundo SILVA *et al.* (2000) devido ao manejo do solo ao longo dos anos com preparo convencional do solo, ocorre uma compressão das partículas do solo, sem, entretanto, ocorrer os mecanismos que contribuem para a estabilização desses torrões, não apresentando as qualidades positivas de um agregado. Esse tipo de agregado, segundo Horn (1988), possui menor grau de resistência interna, o que causa a

deterioração da estrutura do solo, formando agregados grandes, porém, densos e fracos, com poucos poros interagregados e de menor diâmetro.

Em um trabalho desenvolvido por Souza *et al.* (2006a) avaliando o efeito de sistemas de colheita da cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho, observou-se que, na camada superficial, o solo apresenta maiores teores de DMG e agregados > 2 mm, menor quantidade de agregados < 1 mm e maior teor de matéria orgânica. Além disso, a maior estabilidade de agregados em superfície ocorre em consequência da maior concentração de raízes nas camadas superficiais. Essa maior concentração de raízes na superfície, possivelmente, explica a maior estabilidade de agregados, concordando com os resultados obtidos nesta pesquisa.

7.3. Interação manejo e local – anos de 2008 e 2009

Os teores de matéria orgânica foram mais baixos nos rodados para todos os sistemas de manejo da cana-de-açúcar estudados, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 5 e 6). A movimentação e o preparo do solo para o cultivo (aração, gradagem e abertura de sulcos) favorecem as reações de oxidação, por meio do aumento da pressão parcial de oxigênio e da exposição de novas superfícies para o ataque microbiano. Sistemas mais conservacionistas como o sistema de controle de tráfego e o piloto automático tendem, com o tempo, a apresentar um incremento de matéria orgânica na superfície do solo, com contribuição do acúmulo de palha na superfície do solo nestes sistemas (FREIXO *et al.*, 2002). De acordo com Gonçalves e Ceretta (1999), em solos tropicais, é difícil obter aumentos significativos nos teores de matéria orgânica a curto prazo.

Observa-se para os anos de 2008 e 2009 que os valores de densidade do solo, porosidade total e macroporosidade diferiram nos locais de coleta das amostras de solo (Tabelas 5 e 6). Verificou-se em 2008 maiores valores para a densidade do solo no rodado diferindo das posições da linha de plantio e enterrrodado, demonstrando que o preparo do solo foi eficaz para garantir o desenvolvimento da cultura, pois densidades altas na linha de plantio inibem o desenvolvimento radicular das culturas. Tais resultados são concordantes com os obtidos por Correchel *et al.* (1999), quando avaliaram a influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo e, observaram

menores valores desta variável na linha de plantio em comparação com a entrelinha. Queiroz-Voltan *et al.* (1998) estudando os aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar, sob o efeito da compactação do solo, verificaram numa área total de aproximadamente 70.000 ha de cultura de cana-de-açúcar, que não foram encontradas áreas com densidades do solo superiores a 1,23 kg dm⁻³ e nos níveis de densidade estudados, não foram observadas alterações histológicas significativas nas raízes.

Para o ano de 2009, verificou-se um aumento da densidade do solo na camada superficial (0,00-0,10 m), não havendo diferença significativa entre as posições de coleta das amostras de solo (Tabela 6). Com apenas um ano de manejo ocorreu aumento da densidade do solo na linha de plantio e em enterrado, demonstrando que os sistemas de manejo com controle de tráfego e piloto automático não garantiram qualidade física nas regiões de maior desenvolvimento radicular da cultura de cana-de-açúcar. Resultados semelhantes foram observados por Paulino *et al.* (2004) avaliando o efeito da escarificação de um Latossolo Vermelho em área cultivada com cana-de-açúcar, os quais verificaram que o manejo de pós-colheita em soqueiras de cana-de-açúcar alterou a densidade do solo, a macro e a microporosidade. Segundo Queiroz-Voltan *et al.* (1998) os ciclos de secamento e umedecimento no solo promovem o aumento da sua densidade do solo na entrelinha da cultura. Entretanto, a ação das raízes, melhora a estrutura do solo na linha e, pode compensar os efeitos dos ciclos de secamento e umedecimento.

Nota-se para a porosidade total do solo que nos anos de 2008 e 2009 não foi verificado diferença significativa entre os locais de amostragem de solo (Tabelas 5 e 6). Independente do local de amostragem os valores da porosidade total esteve acima de 0,50 m³ m⁻³, segundo Kiehl (1979) porosidade ideal para a produção agrícola, portanto, o sistema de preparo do solo foi eficaz no plantio e o tráfego de veículos agrícolas não alterou a porosidade do solo no primeiro ano de cana soca (2009). Estes resultados corroboram os de Souza *et al.* (2005), os quais verificaram valores de porosidade total próximo a 0,50 m³ m⁻³ em cana soca (quinto corte). Resultados contrários foram obtidos por Souza *et al.* (2006a), os quais verificaram decréscimo da porosidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho.

Tabela 5. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para o sistema de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) em diferentes pontos de coleta, no ano de 2008.

Sistema de Manejo	Local					
	LP ¹	ER ²	R ³	LP	ER	R
	-----Densidade do solo (kg dm ⁻³)-----			-----Porosidade total (m ³ m ⁻³)-----		
CT	1,08 Aa	1,11 Aab	1,21 Ab	0,50 Aa	0,52 Aa	0,52 Aa
PA	1,07 Aa	1,12 Aa	1,23 Ab	0,50 Aa	0,55 Ab	0,52 Aab
T	1,08 Aa	1,16 Aab	1,25 Ab	0,51 Aa	0,54 Aa	0,52 Aa
	-----Macroporosidade (m ³ m ⁻³)-----			-----Microporosidade (m ³ m ⁻³)-----		
CT	0,11 Aa	0,11 Aa	0,08 Ab	0,39 Aa	0,41 Aab	0,44 Ab
PA	0,10 Aab	0,12 Aa	0,09 Ab	0,39 Aa	0,43 Aab	0,44 Ab
T	0,10 Aab	0,11 Aa	0,08 Ab	0,41 Aa	0,43 Aa	0,44 Aa
	-----Teor de água no solo (g g ⁻¹)-----			-----Resistência do solo (MPa)-----		
CT	0,18 Aa	0,18 Aa	0,19 Aa	1,50 Aa	3,43 Aa	4,91 Aa
PA	0,18 Aa	0,17 Aa	0,17 Aa	1,30 Aa	2,95 Aa	5,97 Aa
T	0,20 Aa	0,20 Aa	0,20 Aa	1,55 Aa	4,66 Aa	6,23 Aa
	-----Matéria orgânica (g kg ⁻¹)-----			--Diâmetro médio ponderado (mm)-		
CT	34,00 Aa	27,00 Aa	19,70 Ab	2,62 Aa	2,25 Aab	1,98 Ab
PA	19,30 Ba	19,30 Aa	15,70 Aa	2,91 Aa	2,30 Ab	2,20 Ab
T	15,00 Ba	17,00 Ba	14,30 Aa	2,68 Aa	2,29 Aa	2,19 Aa
	-Diâmetro médio geométrico (mm)-			-----Agregados > 2,0 mm (%)-----		
CT	1,87 Aa	1,48 Aab	1,24 Ab	53,00 Aa	43,2 Aab	35,80 Ab
PA	2,15 Aa	1,50 Ab	1,42 Ab	61,60 Aa	44,40 Ab	41,50 Ab
T	1,91 Aa	1,49 Aa	1,37 Aa	55,20 Aa	44,50 Aa	41,10 Aa

¹linha de plantio; ²enterrrodado; ³rodado; Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a macroporosidade, observa-se que não houve diferença entre os locais de amostragem no ano de 2008 (cana-soca) e, em 2009 o valor da macroporosidade diminuiu em todos os locais de amostragem, sendo que o rodado diferiu do enterrrodado e linha de plantio (Tabelas 5 e 6). Segundo Baver (1972) o valor mínimo do espaço ocupado pelo ar deve ser de 0,10 m³ m⁻³, para que haja um desenvolvimento satisfatório do sistema radicular. Nota-se pelos

resultados apresentados em 2009 que, em termos de distribuição do tamanho dos poros, os três locais de amostragem apresentaram valores abaixo do ideal e, os locais de enterrados e rodados apresentaram valores de macroporosidade, bem abaixo do valor mínimo necessário. Abaixo desse valor, a aeração do solo pode ser reduzida de maneira drástica (XU *et al.*, 1992), a ponto de prejudicar a respiração de raízes e, portanto, o crescimento radicular.

Tabela 6. Atributos físicos do solo e teor de matéria orgânica para o sistema de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) em diferentes pontos de coleta, no ano de 2009.

Sistema de Manejo	Local					
	LP ¹	ER ²	R ³	LP	ER	R
	-----Densidade do solo (kg dm ⁻³)-----			-----Porosidade total (m ³ m ⁻³)-----		
CT	1,21 Aa	1,29 Aa	1,29 Aa	0,56 Aa	0,54 Aa	0,53 Aa
PA	1,20 Aa	1,23 Aa	1,31 Aa	0,56 Aa	0,61 Aa	0,54 Aa
T	1,16 Aa	1,29 Ab	1,28 Ab	0,57 Aa	0,55 Aa	0,54 Aa
	-----Macroporosidade (m ³ m ⁻³)-----			-----Microporosidade (m ³ m ⁻³)-----		
CT	0,07 Aa	0,05 Aab	0,04 Ab	0,49 Aa	0,50 Aa	0,50 Aa
PA	0,08 Aa	0,06 Aab	0,04 Ab	0,49 Aa	0,55 Aa	0,51 Aa
T	0,07 Aa	0,03 Ab	0,04 Ab	0,50 Aa	0,52 Aa	0,50 Aa
	-----Teor de água no solo (g g ⁻¹)-----			-----Resistência do solo (MPa)-----		
CT	0,18 Aa	0,17 Aa	0,18 Aa	1,35 Aa	2,25 Ab	3,00 Ac
PA	0,17 Aa	0,17 Aa	0,17 Aa	1,64 Aa	2,49 Ab	3,14 Ac
T	0,18 Aa	0,18 Aa	0,19 Aa	1,69 Aa	2,69 Ab	3,03 Ab
	-----Matéria orgânica (g kg ⁻¹)-----			--Diâmetro médio ponderado (mm)--		
CT	34,00 Aa	27,00 Aa	19,70 Ab	1,85 Aa	1,72 Aa	1,58 Aa
PA	19,30 Ba	19,30 Aa	15,70 Ab	1,92 Aa	1,71 Aab	1,56 Ab
T	15,00 Ba	17,00 Ba	14,30 Aa	2,04 Aa	1,67 Ab	1,64 Ab
	-Diâmetro médio geométrico (mm)-			-----Agregados > 2,0 mm (%)-----		
CT	1,11 Aa	1,01 Aa	0,92 Aa	31,70 Aa	28,60 Aa	24,80 Aa
PA	1,17 Aa	1,01 Aab	0,88 Ab	34,30 Aa	28,4 Aab	24,90 Ab
T	1,34 Aa	1,04 Ab	0,99 Ab	40,40 Ba	26,30 Ab	26,00 Ab

¹Linha de plantio; ²Enterrado; ³Rodado do trator; Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os sistemas de manejo com controle de tráfego e piloto automático não mantiveram a qualidade física do solo, com valores baixos para a macroporosidade em ambos os sistemas no ano de 2009 (Tabela 6). Este resultado evidencia o efeito do tráfego de máquinas pesadas nos tratos culturais e, principalmente, na colheita da cana-de-açúcar, corroborando os resultados de Streck *et al.* (2004). Carvalho *et al.* (1991) afirmaram que a macroporosidade é o atributo mais afetado pelo cultivo contínuo de cana-de-açúcar. Silva e Ribeiro (1997) estudando o efeito de vários anos de cultivo convencional, com cana-de-açúcar, verificaram que, nos solos com maior tempo de cultivo, a porosidade diminuía e, com maior evidência, a macroporosidade.

Os valores dos atributos do solo DMP, DMG e agregados > 2,0 mm diminuíram do ano de 2008 para 2009, com os menores valores observados em enterrados e rodados diferindo da linha de plantio (Tabelas 5 e 6). Em todos os sistemas de manejo da cana-de-açúcar estudados a estabilidade de agregados foi reduzida. Isto é concordante com o resultados obtidos por Góes *et al.* (2005), os quais observaram que o revolvimento do solo para o plantio e cultivo da cana-de-açúcar tem maior efeitos na estabilidade de agregados em relação a matéria orgânica e ao tempo de cultivo em um Latossolo Vermelho distroférico. Silva e Ribeiro (1997) estudando o efeito de vários anos de cultivo convencional de cana-de-açúcar, verificaram que, nos solos com maior tempo de cultivo, a porosidade diminuía, com maior evidência para a macroporosidade, visto que esta última representa os espaços entre os agregados mais afetados pelo manejo.

Observa-se que os menores valores dos atributos da estabilidade de agregados estão de acordo com os valores de matéria orgânica, ou seja, os locais de coleta de solo com os menores valores de matéria orgânica, enterrados e rodados, apresentaram os menores valores para o DMP, DMG e agregados > 2,0 mm (Tabelas 5 e 6). Em todos os sistemas de manejo foi efetuada a colheita mecânica da cana (cana crua), com a manutenção da palha na superfície do solo, sendo que este acúmulo de palha na superfície do solo provavelmente foi responsável pelo aumento do teor de matéria orgânica. Tal aspecto está de acordo com os resultados obtidos por Souza *et al.* (2005), os quais verificaram que as áreas colhidas mecanicamente (cana crua) tiveram um incremento do teor de matéria orgânica promovendo uma melhor agregação de um Latossolo Vermelho.

A estabilidade de agregados foi superior na linha de plantio em todos os sistemas de manejo da cana-de-açúcar nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 5 e 6). Estes resultados estão

coerentes com a não mecanização nesta área e maiores valores de matéria orgânica. Tisdall e Oades (1982) citam que hifas de fungos e a atividades de raízes são importantes na agregação do solo. Oades (1984) constatou que significativa quantidade de C-orgânico é perdida rapidamente por causa das operações de cultivo. Portanto, a maior estabilidade de agregados parece estar relacionada não só com o maior acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo na linha de plantio, mas também com o volume e distribuição de raízes ao longo do perfil cultural do solo.

Os locais de amostragens do solo em enterrado e rodado apresentaram os maiores valores para a resistência do solo à penetração, provavelmente por causa do maior tráfego de veículos agrícola nesta área, nos anos de 2008 e 2009 (Tabelas 5 e 6). Independentemente do sistema de colheita de cana-de-açúcar, houve aumento da resistência do solo à penetração nestes dois locais de coleta das amostras de solo, confirmando os dados de Silva *et al.* (2000), que avaliaram a resistência mecânica do solo à penetração pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo em um Latossolo Vermelho. Houve aumento da resistência à penetração da linha de plantio para o rodado, com valores considerados restritivos ao desenvolvimento radicular. Arshad *et al.* (1996) afirmam que valores entre 2,0 e 4,0 MPa dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Ivo (1999) estudando a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo de Tabuleiro Costeiro sob diferentes preparos, concluiu que a distribuição das raízes no perfil mostrou-se diferente entre os preparos, tendo as raízes concentradas na área do sulco de plantio.

A resistência do solo à penetração foi superior nos locais com maior movimentação dos veículos agrícolas (Tabelas 5 e 6), o que é coerente com o maior tráfego de máquinas e a maior densidade do solo, confirmando os estudos de Hakansson e Voorhees (1997) e Hartemink (1998). No entanto, verifica-se que o teor de água no solo está muito próximo em todos os locais de amostragem. Deve-se considerar que, em todos os sistemas de manejo avaliado a cana foi colhida mecanicamente (cana crua), cujos restos culturais foram mantidos na superfície do solo, com subsequente manutenção do teor de água. Resultados semelhantes, aos descritos, foram observados por Souza *et al.* (2005), em área cultivada com cana crua em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.

7.4. Análise conjunta – comparação dos anos de 2008 e 2009

Observando-se os valores dos testes estatísticos para o diâmetro médio ponderado, obteve-se no presente estudo, uma redução do valor médio entre os anos de 2008 e 2009, de 2,38 para 1,75 mm (Tabela 7). Fato que corrobora os dados obtidos por Souza *et al.* (2005), que aliados à diminuição dos valores da porcentagem de agregados maiores que 2,0 mm e do diâmetro médio geométrico entre os dois anos, indicam uma redução das condições físicas do solo devido ao tráfego de maquinário; fato este que não sofreu influência do manejo adotado sobre a área. Os valores médios individuais para o diâmetro médio ponderado indicam ainda que o manejo do piloto automático não apresentou diferença significativa dos demais tratamentos, uma vez que a influência do tráfego do maquinário pôde ser notada com a diminuição destas variáveis na linha de plantio nas profundidades de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m.

Houve uma relação direta entre a densidade do solo e a microporosidade, tal que, no ano com maior valor de densidade do solo (2009), ocorreu maior volume de microporos (Tabela 7). Com relação ao volume de macroporos, a relação com a densidade foi inversa, resultados semelhantes foram observados por Secco *et al.* (2004). Os valores de macroporosidade do solo atingiram valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, quando a densidade média foi de $1,26 \text{ kg dm}^{-3}$, indicando maior risco de limitações ao crescimento radicular nos manejos que apresentaram valores de densidade maiores do que $1,26 \text{ kg dm}^{-3}$. Concordando com os resultados obtidos por Souza e Alves (2003) estudando os atributos físicos e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho sob diferentes usos e manejos.

Tabela 7. Testes estatísticos entre o primeiro e segundo ano do experimento para o sistema de manejo controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T) na linha de plantio (LP), no enterrodado (ER) e no rodado (R), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Diâmetro médio ponderado (mm)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	3,41 A	3,01 A	2,33 A	2,91 A	2,21 A	1,79 A	2,87 A	1,95 A	1,78 A	3,16 A	2,55 A	2,17 A	2,81 A	2,10 A	1,85 A	2,80 A	1,85 A	1,30 A	3,15 A	2,85 A	2,05 A	3,04 A	2,18 A	1,66 A	2,89 A	2,08 A	1,63 A	2,38 A
2009	2,30 B	1,91 B	1,57 A	2,06 A	1,76 A	1,31 A	1,81 B	1,65 A	1,24 A	2,21 B	1,95 A	1,40 A	2,14 A	1,72 A	1,31 A	2,10 A	1,47 A	1,19 A	2,31 A	2,23 A	1,61 A	1,90 B	1,85 A	1,28 A	2,06 A	1,63 A	1,24 A	1,75 B
Diâmetro médio geométrico (mm)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	2,72 A	2,22 A	1,52 A	2,09 A	1,37 A	1,06 A	2,04 A	1,20 A	1,03 A	2,41 A	1,79 A	1,43 A	2,00 A	1,33 A	1,14 A	1,96 A	1,08 A	0,70 A	2,41 A	2,09 A	1,26 A	2,27 A	1,33 A	0,89 A	2,01 A	1,20 A	0,91 A	1,61 A
2009	1,46 B	1,15 B	0,91 A	1,32 B	1,04 A	0,69 A	1,06 B	0,91 A	0,67 A	1,36 B	1,18 A	0,80 A	1,31 A	1,00 A	0,72 A	1,30 A	0,84 A	0,63 A	1,66 A	1,42 A	0,96 A	1,25 B	1,12 A	0,76 A	1,31 B	0,97 A	0,70 A	1,06 B
Agregados > 2,0 mm (%)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	76,1 A	64,1 A	44,9 A	61,2 A	41,2 A	31,0 A	60,7 A	33,9 A	30,1 A	68,3 A	50,5 A	40,3 A	58,3 A	39,0 A	32,4 A	58,1 A	31,7 A	17,8 A	68,6 A	59,9 A	37,1 A	64,8 A	41,4 A	27,5 A	61,1 A	36,7 A	25,5 A	46,74 A
2009	45,2 B	32,7 B	24,9 A	36,7 B	30,2 A	18,5 A	30,1 B	27,0 A	17,9 A	41,1 B	34,3 A	19,7 A	39,5 A	28,1 A	18,2 A	38,2 A	20,9 A	15,4 A	50,1 A	43,4 A	27,8 A	32,2 B	30,7 A	16,1 A	35,9 B	25,6 A	16,5 A	29,52 B
Resistência do solo à penetração (MPa)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	0,64 A	0,96 A	2,31 A	0,83 A	3,20 A	4,85 A	4,22 A	6,76 A	6,95 A	0,66 A	1,36 A	2,51 A	1,09 A	4,39 A	4,82 A	2,03 A	4,83 A	7,87 A	0,76 A	2,19 A	1,73 A	2,07 A	6,49 A	5,42 A	2,83 A	7,35 A	8,52 A	3,62 A
2009	0,88 A	1,70 A	2,34 A	1,43 A	3,03 A	3,04 A	2,09 A	3,51 A	3,83 A	0,76 A	1,47 A	1,84 A	1,32 A	2,74 A	2,71 A	1,87 A	3,43 A	3,73 A	1,13 A	1,90 A	2,07 A	1,55 A	3,04 A	3,51 A	1,75 A	3,64 A	3,70 A	2,37 B

Continuação

Porosidade total (m ³ m ⁻³)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	0,53 A	0,45 A	0,50 A	0,56 A	0,50 A	0,57 A	0,52 A	0,53 A	0,51 A	0,47 A	0,50 A	0,53 A	0,53 A	0,48 A	0,54 A	0,54 A	0,52 A	0,51 A	0,54 A	0,52 A	0,48 A	0,56 A	0,49 A	0,57 A	0,54 A	0,52 A	0,50 A	0,52 A
2009	0,57 A	0,57 A	0,55 A	0,54 A	0,74 B	0,54 A	0,53 A	0,54 A	0,54 A	0,58 A	0,56 A	0,55 A	0,55 A	0,54 A	0,54 A	0,53 A	0,53 A	0,54 A	0,58 A	0,59 A	0,56 A	0,54 A	0,55 A	0,55 A	0,55 A	0,54 A	0,54 A	0,56 B
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	0,11 A	0,10 A	0,10 A	0,13 A	0,09 A	0,13 A	0,08 A	0,09 A	0,08 A	0,10 A	0,13 A	0,11 A	0,13 A	0,10 A	0,12 A	0,09 A	0,08 A	0,07 A	0,10 A	0,11 A	0,10 A	0,14 A	0,08 A	0,12 A	0,09 A	0,06 A	0,08 A	0,10 A
2009	0,08 A	0,08 A	0,06 A	0,05 B	0,05 A	0,06 A	0,02 A	0,04 A	0,05 A	0,07 A	0,08 A	0,07 A	0,07 A	0,04 A	0,04 B	0,03 A	0,04 A	0,03 A	0,07 A	0,09 A	0,07 A	0,02 B	0,02 A	0,04 B	0,03 A	0,04 A	0,04 A	0,05 B
Microporosidade (m ³ m ⁻³)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	0,43 A	0,35 A	0,40 A	0,43 A	0,41 A	0,44 A	0,44 A	0,44 A	0,43 A	0,37 A	0,38 A	0,42 A	0,41 A	0,39 A	0,42 A	0,45 A	0,43 A	0,43 A	0,44 A	0,41 A	0,38 A	0,43 A	0,42 A	0,45 A	0,45 A	0,45 A	0,45 A	0,42 A
2009	0,49 A	0,49 A	0,49 A	0,49 A	0,69 B	0,48 A	0,51 A	0,50 A	0,48 A	0,52 A	0,48 A	0,48 A	0,49 A	0,50 A	0,50 A	0,49 A	0,50 A	0,51 A	0,51 A	0,50 A	0,49 A	0,52 A	0,53 A	0,51 A	0,52 A	0,50 A	0,50 A	0,51 B
Densidade do solo (kg dm ⁻³)																												
Manejo	Piloto automático									Controle de tráfego									Testemunha									Média
Local	LP			ER			R			LP			ER			R			LP			ER			R			
Profundidade	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
2008	1,03 A	1,07 A	1,13 A	1,08 A	1,11 A	1,18 A	1,18 A	1,25 A	1,28 A	1,00 A	1,08 A	1,17 A	1,00 A	1,13 A	1,21 A	1,16 A	1,22 A	1,27 A	1,08 A	1,11 A	1,08 A	1,09 A	1,15 A	1,26 A	1,15 A	1,31 A	1,30 A	1,15 A
2009	1,19 A	1,20 A	1,22 A	1,27 A	1,18 A	1,27 A	1,34 A	1,30 A	1,29 A	1,17 A	1,21 A	1,27 A	1,27 B	1,32 A	1,30 A	1,31 A	1,32 A	1,25 A	1,16 A	1,14 A	1,21 A	1,29 B	1,29 A	1,30 A	1,30 A	1,28 A	1,28 A	1,26 B

Verifica-se que os menores níveis de compactação estiveram abaixo do valor de 2,5 MPa para a resistência do solo à penetração na linha de plantio, sendo este valor então adotado como limitante ao crescimento radicular e da parte aérea das plantas (TORMENA *et al.*, 1998). A macroporosidade diminuiu e a porosidade total e microporosidade aumentaram com o incremento da densidade do solo (Tabela 7). Indicando que o tráfego do maquinário exerceu compactação acentuada à área. A redução da macroporosidade também foi observada como crescente da linha de plantio em direção ao rodado, indicando a compactação causada pelo tráfego nos locais de maior aplicação das cargas uniaxiais.

Os valores de densidade do solo aumentaram do ano de 2008 para o ano de 2009, sendo crescente da linha de plantio para o rodado, com valores intermediários no entrerrodado para todos os manejos estudados. Em profundidade, comportamento semelhante, foram encontrados por Merotto e Mundstock (1999), Beutler *et al.* (2002) e Stone *et al.* (2002). Souza e Alves (2003) observaram aumento dos atributos físicos em profundidade em um Latossolo Vermelho. A compactação subsuperficial observada é função principalmente da carga total por eixo das máquinas (CUNHA *et al.*, 2009). Raper (2005) recomendou reduzir ao máximo a carga por eixo, usar pneus radiais com menor pressão de insulflagem e adotar o tráfego controlado para evitar este problema. A compactação e o adensamento do solo são responsáveis pelo impedimento do desenvolvimento do sistema radicular das plantas e, conseqüentemente, pela dificuldade destas em buscar água e nutrientes nas camadas mais profundas.

Os dados mostram que, ao aumentar o estado de compactação do solo, observado de 2008 para 2009, ocorre um aumento da porosidade total e microporosidade com diminuição na macroporosidade (Tabela 7). Boeni (2000) estudando o tráfego por trator com diferentes pressões de inflação nos pneus em um Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho encontrou redução da porosidade total e aumento da microporosidade com aumento da pressão de inflação nos pneus para o primeiro solo, e aumento da microporosidade com redução da macroporosidade sem diferença para pressão de inflação no segundo solo.

Os resultados encontrados concordam com os obtidos por Voorhees *et al.* (1978) e Voorhees *et al.* (1986), os quais observaram que as máquinas agrícolas com carga por eixo elevadas causaram aumento da densidade do solo e resistência à penetração do solo para profundidades maiores que 0,30 m. A compactação abaixo da camada arável é função da carga

total por eixo e a compactação em superfície observada é função da pressão de inflação dos pneus (SALIRE *et al.*, 1994).

O tempo de realização do experimento (dois anos) não possibilita a observação de efeitos positivos mais expressivos do tráfego controlado, pois conforme estudos de Costa *et al.* (2003) e Assis e Lanças (2005), somente a longo prazo estes efeitos se tornam melhor identificáveis. Segundo estudos de Correchel *et al.* (1999), a variação da densidade do solo no campo é influenciada pela posição relativa à linha de cultivo e o efeito da posição relativa à linha de cultivo na distribuição da densidade do solo não depende do sistema de preparo do solo, corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

A ocorrência sistemática de tráfego em todos os manejos, aliada ao histórico de uso da área pela usina, com maquinários transitando sobre a área sem controle de linhas determinadas e problemas na condução das parcelas colhidas com o piloto automático, são possíveis causas da não observação de diferenças significativas entre os manejos em estudo.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Braunack *et al.* (2006), o cultivo da cana-de-açúcar acarretou aumento da compactação decorrente do tráfego de máquinas e conseqüentemente aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade, com maior intensidade entre as linhas de plantio, conforme observado nestes dois anos de realização do presente experimento. Para estes autores, o efeito do tráfego pareceu ser cumulativo, tornando as diferenças entre os manejos significativas com cada ano adicional de tráfego, sendo, portanto, os dois anos de realização do presente experimento de curto prazo para diferenciação entre os manejos.

7.5. Curva de retenção de água

Aplicou-se o modelo de Van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980) para obtenção da curva de retenção de água no solo (Figuras 11, 12 e 13). Visualizando o traçado das curvas de retenção de água, observaram-se diferenças entre a quantidade de água armazenada nos diferentes locais de coleta e também com a profundidade, indicando que os atributos do solo influenciaram o conteúdo de água retido nas diferentes tensões. Klein (1998) utilizando câmaras de Richards na determinação da curva característica de água no solo, verificou que o uso e o manejo do solo alteraram o traçado das curvas de retenção de água em função da redução da porosidade e na distribuição de poros até a profundidade de 0,4 m.

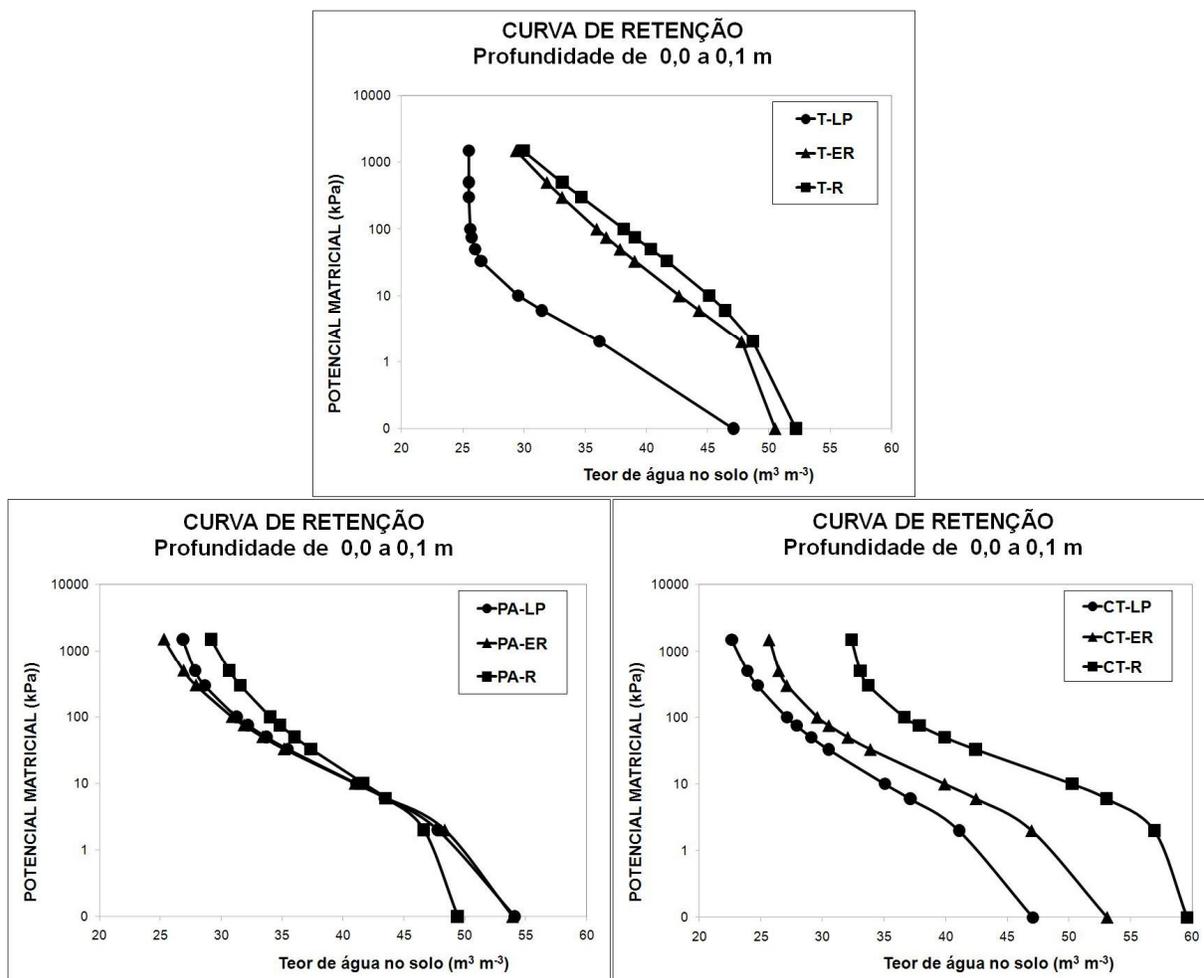


Figura 11. Curva de retenção de água para os sistemas de manejo da cana-de-açúcar com controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nos diferentes locais de amostragem (linha de plantio - LP, enterrodado - ER e rodado - R), para a profundidade de 0,00-0,10 m.

Na retenção de água no solo, além do efeito da compactação e da granulometria do solo, muitos estudos relatam a importância da matéria orgânica, conforme descrito em Rawls *et al.* (2003). Assim, ao verificar-se o conteúdo de matéria orgânica, observa-se que o manejo controle de tráfego apresentou teor de matéria orgânica de $34,0 \text{ g kg}^{-1}$, na profundidade de 0,00-0,10 m, seguido pelo manejo piloto automático com teor de $19,3 \text{ g kg}^{-1}$ e o tratamento testemunha com $15,0 \text{ g kg}^{-1}$, porém, o conteúdo de água retido no solo não seguiu essa ordem, indicando que a matéria orgânica teve pouco efeito direto na retenção de água (Tabela 6). Resultados semelhantes foram obtidos por Beutler *et al.* (2002), Shaver *et al.* (2002) e Rawls *et al.* (2003), que mencionam que em solos argilosos o efeito da matéria orgânica na retenção de

água é pequeno e indireto, ou seja, atua na melhoria da estrutura do solo, aumentando a agregação e a porosidade do solo e, assim aumenta o conteúdo de água em tensões próximas e inferiores a capacidade de campo. Pequenos incrementos no teor de matéria orgânica têm pouca influência na retenção de água em solos argilosos (RAWLS *et al.*, 2003).

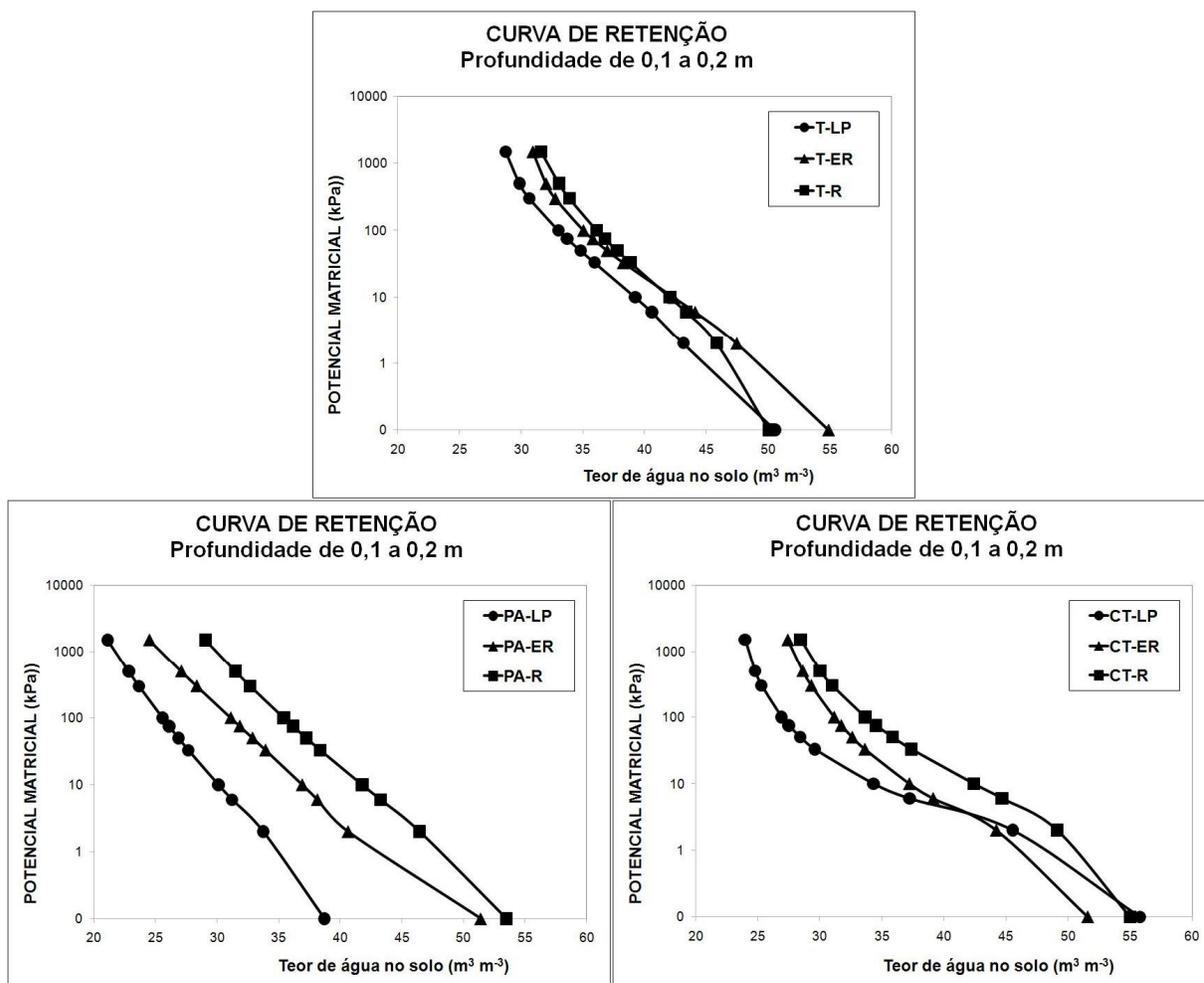


Figura 12. Curva de retenção de água para os sistemas de manejo da cana-de-açúcar com controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nos diferentes locais de amostragem (linha de plantio - LP, enterrrodado - ER e rodado - R), para a profundidade de 0,10-0,20 m.

A inclinação da curva de retenção de água indica a distribuição do tamanho dos poros e a qualidade física do solo para o crescimento das plantas. Nos pontos de coleta enterrrodado e rodado observa-se as menores inclinações nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, indicando decréscimo da qualidade física do solo, ou seja, distribuição desproporcional no tamanho dos

poros (Figuras 12 e 13). A compactação, de maneira geral, aumenta a quantidade de água contida na faixa de disponibilidade para as plantas (BEUTLER *et al.*, 2002). Entretanto, há casos em que isso não corre, como no trabalho de Stone *et al.* (1994). Esses autores avaliaram a evolução de alguns atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho argiloso, após sete cultivos sucessivos, sob pivô central com arroz e feijão e observaram que a água disponível na camada superficial, 0,00-0,20 m, diminuiu de 10,6 para 8,0 mm, enquanto na camada de 0,20-0,40 m, o decréscimo foi de 9,0 para 7,2 mm. A interpretação da disponibilidade, contudo, não é simples, uma vez que a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo podem dificultá-la.

Na tensão de 0,001 MPa todos os manejos apresentaram tendência de maior retenção de água em profundidade (Figuras 11, 12 e 13). Constatação também observada na tensão de 0,006 MPa. Essa maior retenção de água em baixas tensões pode ser creditada a maior quantidade das frações finas do solo (argila + silte), a exemplo do que encontraram Centurion e Andrioli (2000). Esses pesquisadores verificaram que a retenção de água no solo correlacionou-se melhor com a soma dos teores de silte e argila. Entretanto, com o incremento da tensão, sobretudo a partir de 0,033 MPa, os teores mais altos de água ocorreram nos pontos de coleta com maiores valores de compactação (rodado e enterrodado), concordando com os resultados obtidos por Beutler *et al.* (2002) em um Latossolo Vermelho, para a cultura de cana-de-açúcar e algodão.

Verificou-se maior retenção de água, em função do aumento da profundidade em quase todas as tensões, bem como decréscimo mais gradual do conteúdo de água com o aumento da tensão em todos os manejos e profundidades do solo, corroborando com Reichardt (1987) e Demattê (1988). A quantidade de matéria orgânica teve pouca influência na retenção de água no solo, concordando com os estudos de Grohmann e Medina (1962), em que pequenas variações no teor de matéria orgânica mostraram pouca influência na retenção de água. Isto demonstra que outros atributos, como a densidade do solo, tiveram maior importância.

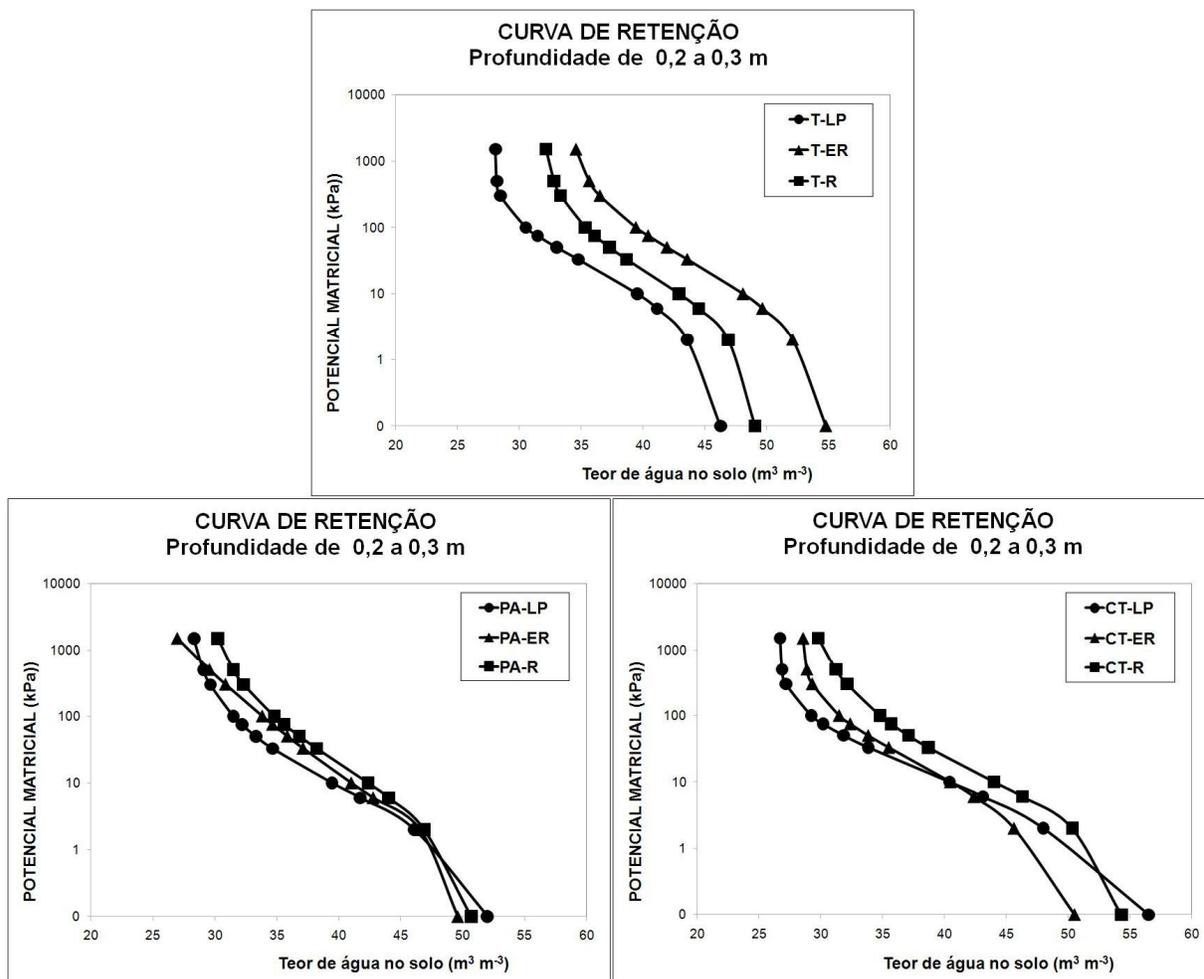


Figura 13. Curva de retenção de água para os sistemas de manejo da cana-de-açúcar com controle de tráfego (CT), piloto automático (PA) e testemunha (T), nos diferentes locais de amostragem (linha de plantio - LP, entrerrodado - ER e rodado - R), para a profundidade de 0,20-0,30 m.

Ocorreu incremento no conteúdo de argila e maior densidade do solo, com o aumento da profundidade, promovendo efeito positivo e superior ao da matéria orgânica na retenção de água. Segundo Grohmann e Medina (1962), em perfil heterogêneo em relação à textura, a importância da matéria orgânica na retenção de água pelo solo é menos evidente. Neste sentido, Zimback (1993) verificou a eficiência significativa da matéria orgânica na retenção de água somente em horizontes arenosos.

7.6. Intervalo hídrico ótimo

Os valores dos potenciais na capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) nos limites críticos de potenciais de água no solo aumentaram de acordo com a densidade do solo, em todos os sistemas de manejo (Figura 14). Resultados semelhantes foram observados por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2004). Tal fato era esperado, pois, de acordo com Kertzman (1996), em Latossolos argilosos, a compactação ou o aumento da densidade do solo afeta o espaço poroso entre os agregados, reduzindo o diâmetro dos poros maiores (macroporos), de modo a se tornarem mais eficientes na retenção de água em elevados potenciais. Em baixos potenciais, a relação positiva entre o PMP e a densidade do solo deve-se à maior massa de partículas com elevada superfície de adsorção, uma vez que a compactação geralmente não afeta a microporosidade dentro dos agregados.

Os valores de resistência do solo à penetração (RP) aumentam com a densidade do solo, justificados, por exemplo, pelo fato de que para manter a RP igual a 2,0 MPa é necessário aumentar o teor de água do solo, a fim de compensar a maior fricção entre as partículas resultantes do aumento da densidade (TORMENA *et al.*, 2008). Ressalta-se na Figura 14 que, independentemente dos manejos, a RP foi superior ao PMP em quase toda a extensão de valores de densidade, semelhante aos resultados de Imhoff *et al.* (2001) e Benjamim *et al.* (2003). Tais medidas corroboram com os estudos de Carter *et al.* (1999), sugerindo que sistemas de manejo com mínimo revolvimento do solo ampliam as possibilidades de limitações ao crescimento das plantas pela RP, de modo que esta assume fundamental importância no controle da disponibilidade de água e da qualidade física do solo.

Para os três manejos estudados o IHO teve a resistência à penetração como limite inferior com ligeira restrição por aeração no piloto automático e controle de tráfego (Figura 14). Com o aumento da densidade ocorre decréscimo da porosidade de aeração a 10% (PA), indicando também uma redução dos poros de maior diâmetro. Esses resultados são similares aos obtidos por Silva *et al.* (1994), Imhoff *et al.* (2001) e Leão *et al.* (2004) na determinação do IHO.

A partir do conhecimento do IHO do solo, encontrou-se a densidade do solo em que o IHO é zero, denominado densidade do solo crítica para o crescimento das plantas. De acordo com o IHO determinado por Silva (2007) para o Latossolo Vermelho distroférico, o valor de densidade do solo igual a 1,20 kg dm⁻³ marca o limite a partir do qual ocorrem limitações ao

crescimento radicular relacionadas com elevada resistência do solo à penetração. Tal valor corrobora os encontrados nesta pesquisa, sendo de $1,11 \text{ kg dm}^{-3}$ para o manejo testemunha, $1,17 \text{ kg dm}^{-3}$ para o piloto automático e $1,18 \text{ kg dm}^{-3}$ para o controle de tráfego, indicando que, provavelmente, a não aplicação das técnicas de controle de tráfego (testemunha) implicou em condições de densidade do solo restritivas ao crescimento radicular.

Os valores do IHO não se diferenciaram entre os manejos a partir de densidade do solo igual a $1,18 \text{ kg dm}^{-3}$. Esse resultado revela que os valores máximos de densidade dos manejos não influenciaram o comportamento hídrico do solo, sugerindo que, para valores de densidade superiores a esses, o IHO é determinado por propriedades intrínsecas do solo. Resultados obtidos por Tormena *et al.* (2002), os quais estudaram a variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de plantio direto, observaram valores de densidade do solo crítica semelhante ao obtido nesta pesquisa.

No tratamento testemunha a densidade do solo considerada limitante ou crítica ($1,11 \text{ kg dm}^{-3}$) esteve abaixo dos demais tratamentos estudados (Figura 14). Kaiser *et al.* (2009) avaliando o intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro, em um Latossolo Vermelho, sob diferentes níveis de compactação, verificaram que, para densidades do solo acima de $1,32 \text{ kg dm}^{-3}$, a porosidade de aeração passa a ser o limite superior do IHO, indicando que, a partir desse valor, a porosidade do solo começa a ser alterada pela compactação, principalmente os macroporos, os quais são os principais condutores de ar no solo, o que pode limitar as trocas gasosas e prejudicar as plantas pela deficiência de oxigênio ou excesso de CO_2 . Em períodos de maior umidade, os solos compactados, por possuírem menor quantidade e continuidade de poros, podem apresentar deficiência de oxigênio para as raízes das plantas (LAPEN *et al.*, 2004). Além da falta de oxigênio, o aumento na concentração de CO_2 no ambiente radicular afeta as plantas (GREENWAY *et al.*, 2006).

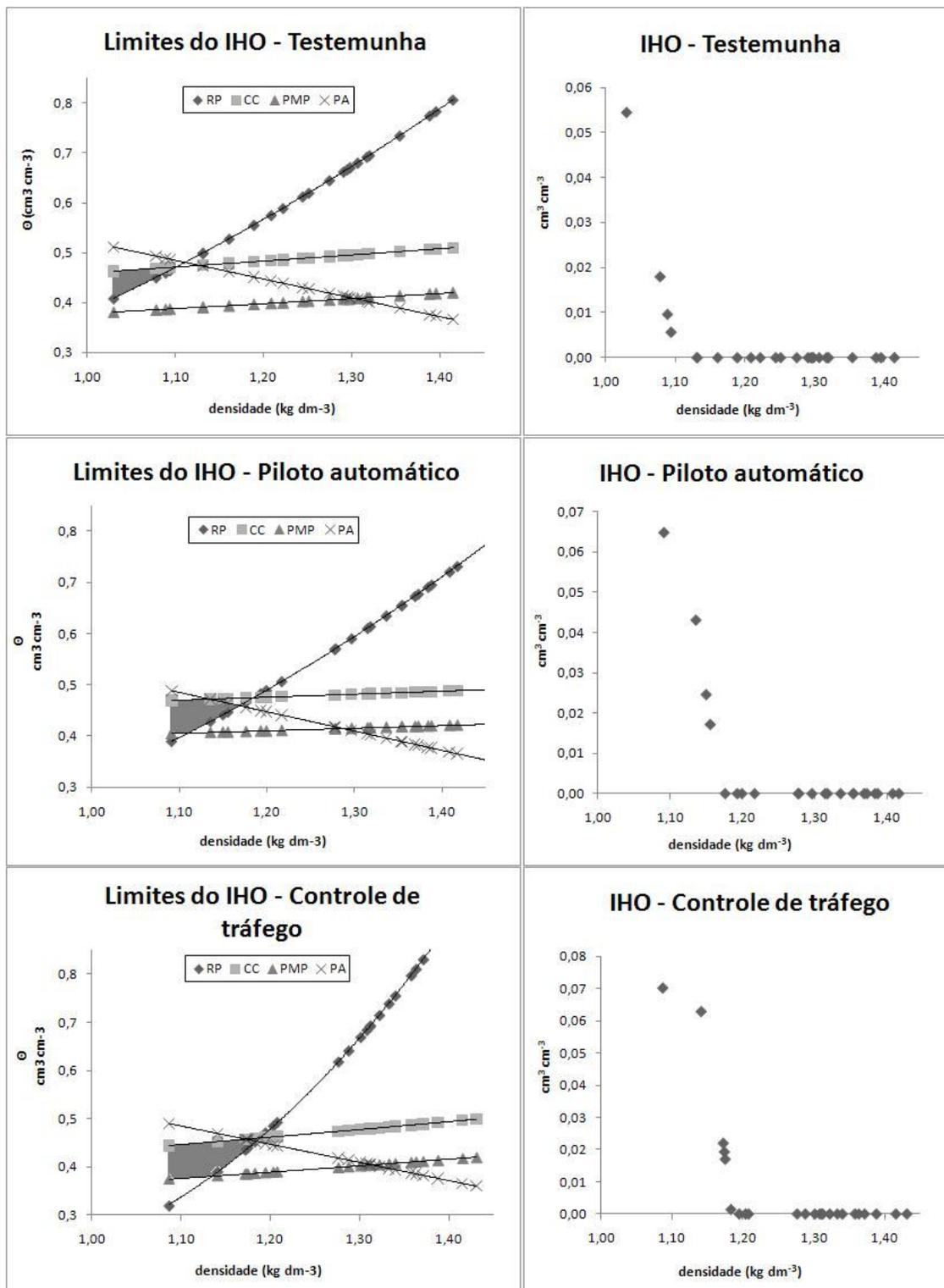


Figura 14. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos limites críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (A) e resistência do solo à penetração de 2 MPa (RP), para os manejos testemunha, piloto automático e controle de tráfego na profundidade de 0,00-0,20 m, após o primeiro ano do experimento. A área cinza representa o IHO, contido no gráfico à direita.

O gráfico do IHO para os manejos piloto automático e controle de tráfego são bem semelhantes, apresentando o controle de tráfego maior disponibilidade de água às plantas (Figura 14). O gráfico do tratamento testemunha apresentou os valores mais baixos para o IHO, indicando que o uso das técnicas de controle de tráfego permite reduzir os efeitos adversos ao solo devido à passagem dos maquinários sobre a linha de plantio da cultura de cana-de-açúcar. Resultados semelhantes foram observados por Tormena *et al.* (1998) estudando a variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico e, por Severiano *et al.* (2008) em área cultivada com cana-de-açúcar, afirmando que o Latossolo Vermelho-Amarelo nas condições de estudo, em razão de sua estrutura granular, mostrou-se mais suscetível à compactação, necessitando de adequação no tráfego de máquinas.

7.7. Produtividade

Não foi verificada diferença significativa entre os tratamentos estudados para a produtividade de cana-de-açúcar (Tabela 8). Porém, observou-se uma tendência de crescimento da produtividade em relação ao primeiro e segundo corte em todos os tratamentos. Os valores obtidos situam-se acima da média de produtividade de São Paulo, que é de 83,54 t ha⁻¹, a maior do Brasil, demonstrando a competência da empresa nos tratos culturais e na busca de melhorias no setor produtivo agrícola. Souza *et al.* (2005) estudando os sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, encontraram valores de produtividade superiores. Segundo Dantas Neto *et al.* (2006), a redução da produtividade da cana-de-açúcar é mais sentida no final do ciclo da cultura e em períodos de estiagem.

As produtividades da soqueira não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos, mesmo que os atributos físicos do solo tenham mostrado distinções (Tabela 8). A semelhança entre os tratamentos pode ser reflexo da disponibilidade de água, visto que, em nenhum momento, os tratamentos passaram por estresse hídrico. Não se observou redução de produção decorrente da compactação do solo, quando o regime hídrico foi adequado para o desenvolvimento da cultura. Segundo Fiorin *et al.* (1997), a restrição ao crescimento das raízes reduz mais a produtividade das culturas em anos em que ocorrem déficit hídrico. Marcolan e

Anghinoni (2006), em estudos com soja, também não observaram influência do manejo na produtividade da cultura.

Tabela 8. Resultados da produtividade da área experimental ($t\ ha^{-1}$), nos dois anos de realização do experimento, seguidos da comparação de suas respectivas médias anuais.

	Manejo	CT ¹	PA ²	T ³	Média
Ano					
2008		97,18 Aa	96,58 Aa	95,73 Aa	96,50 A
2009		102,67 Aa	99,00 Aa	101,27 Aa	100,98 A

¹controle de tráfego; ²piloto automático; ³testemunha. Valores seguidos pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Costa *et al.* (2003), alterações na produtividade das culturas são efeitos de longo prazo, começando a aparecer em sistemas de plantio direto somente após 12 anos do sistema estabelecido. McPhee *et al.* (1995) estudando os efeitos do controle de tráfego na produtividade de grãos identificou respostas de 10% nesta somente após seis anos do experimento instalado. Nesse contexto, sistemas de manejo que aliam colheita de cana-crua e rotação de culturas na renovação do canavial contribuem para a manutenção da estrutura do solo e podem ser considerados medidas-chave na manutenção da sustentabilidade dos agrossistemas canavieiros. Resultados semelhantes foram obtidos nos estudos de Braunack *et al.* (2006), no qual os autores, após 5 anos de colheita da cultura da cana-de-açúcar, identificaram poucas diferenças entre as produtividades de manejos com diferentes níveis de influência da compactação do maquinário sobre a linha de plantio.

8. CONCLUSÕES

Os efeitos positivos devido ao uso do controle de tráfego em áreas cultivadas com cana-de-açúcar não foram identificados, conforme esperado pela hipótese deste trabalho, porém algumas variáveis apontam para uma comprovação desta hipótese. Ressalta-se o curto espaço de tempo do experimento.

Verificou-se aumento da densidade do solo e diminuição do diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e porcentagem de agregados > 2,0 mm, tanto em profundidade como da linha de plantio em direção ao rodado do trator, demonstrando o efeito do peso do maquinário na área trafegada.

Os valores de macroporosidade diminuíram da linha de plantio em direção ao rodado e a microporosidade apresentou resultados inversos, identificando a diminuição da qualidade física do solo na linha de tráfego.

As curvas de retenção de água demonstraram um aumento da disponibilidade de água em profundidade.

O intervalo hídrico ótimo permitiu verificar que os manejos com controle de tráfego apresentaram uma melhor disponibilidade de água às culturas, comprovando-se o esperado.

Não se obteve diferença significativa entre as produtividades tanto entre manejos como entre anos.

Em longo prazo tais efeitos se tornam mais efetivos e podem vir a serem identificados no aumento da produtividade da cultura, devido a uma melhor condição de desenvolvimento radicular, de troca gasosa das raízes e de disponibilidade de água.

Sugere-se para trabalhos futuros ligados a esta temática, um maior tempo de condução do experimento, visando-se uma melhor identificação dos efeitos positivos do controle de tráfego sobre as propriedades físico-hídricas dos solos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T; TIJINK, F.G.J.; VAN DER LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part I - Machine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.73, n.1, p.145-160, 2003.

ANGERS, D.A. Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, n.4, p.1244-1249, 1992.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p.515-522, 2005.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special publication, 49).

BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K.; O'SULLIVAN, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.48, n.4, p.593-601, 1997.

BARTON, H.; McCULLY, W.G.; TAYLOR, H.M.; BOX, J.E.J. Influence of soil compaction on emergence and firstyear growth of seeded grasses. **Journal of Range Management**, Denver, v.19, n.1, p.118-121, 1966.

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

BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (eds). **Soil environmental analysis: physical methods**. 2.ed. Marcel Decher, 2001. p.377-403.

BENJAMIN, J.G.; NIELSON, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1, p.137-148, 2003.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F.; DILY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.1, p.91-95, 2000.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.M.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.167-177, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.829-834, 2002.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.365-371, 2004.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 111p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000.

BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B.; BARROS, N.F. de. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.35, n.202, p.553-568, 1988.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.477-485, 2008.

BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, n.1-2, p.103-121, 2006.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (IAC, Boletim Técnico, 106).

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.

CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science**, Baltimore, v.164, n.2, p.101-110, 1999.

CARVALHO, S.R.; BRUAND, A.; HARDY, M.; LEPRUM, J.C.; JAMAGNE, M. Tassement des sols ferrallitiques Podzólico Vermelho Amarelo sous culture de canne à sucre (état de Rio de Janeiro, Brésil): apport d'une analyse de la porosité associée a une connaissance détaillée de la phase minérale. **Cahiers ORSTOM Série Pedologie**, Paris, v.26, n.1, p.195-212, 1991.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de Carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.527-538, 1998.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.8, p.1467-1473, 1999.

CENTURION, J.F.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.4, p.701-709, 2000.

CHAMEN, W.C.T.; AUDSLEY, E. The economics of traffic control in combinable crops. **Landwards**, London, v.52, n.1, p.24-27, 1997.

CORRECHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.1, p.165-173, 1999.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.527-535, 2003.

CUNHA, J.P.A.R.; CASCÃO, V.N.; REIS, E.F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.3, p.371-375, 2009.

DA ROS, C.O.; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: Efeito sobre a forma de estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.2, p.241-247, 1997.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

DEMATTE, J.L.I. **Manejo de solos ácidos dos trópicos úmidos da região amazônica**. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 215p.

DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.98, n.3, p.303-312, 1987.

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.

DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J. Soil and crop response to zero- and conventional-traffic systems for winter barley in Scotland, 1982-1986. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.18, n.1-2, p.1-26, 1990.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.1, p.191-192, 2000.

DRAGHI, L.; JORAJURÍA, D.; CERRISOLA, C.; DELGADO, L.M. Resistência específica do solo de um pomar frutícola relacionada ao manejo entrelinhas e intensidade de tráfego. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.385-394, 2005.

EHLERS, W.; KOPKE, V.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FENNER, P.T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita da madeira**. 1999. 135 p. Tese (Tese de Livre Docência) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP.

FIORIN, J.E.; REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A. Armazenamento de água no solo e crescimento e produção do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.1, p.249-255, 1997.

FREIXO, A.; MACHADO, P.L.O.A.; GUIMARÃES, C.M.; DIAS, C.A.; FADIGAS, F. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.2, p.425-434, 2002.

FURLANI, C. E. A. **Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na produtividade da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 221p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2000.

GÓES, G.B.; GREGGIO, T.C.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Irriga**, Botucatu, v.10, n.2, p.116-122, 2005.

GONÇALVES, C.N.; CERETTA, C.A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.307-313, 1999.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.73, n.2, p.223-232, 1993.

GREENWAY, H.; ARMSTRONG, W.; COLMER, T.D. Conditions leading to high CO₂ in waterlogged – flooded soils and possible effects on root growth and metabolism. **Annals of Botany**, Oxford, v.98, n.1, p.9-32, 2006.

GROHMANN, F.; MEDINA, H.P. Características de umidade dos principais solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, n.1, p.285-295, 1962.

GUIMARÃES, C.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.703-707, 2001.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v.6, n.1, p.65-100, 1987.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. (Ed.). **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.

HARTEMINK, A.E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, Amsterdam, v.85, n.4, p.283-306, 1998.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Amherst, University of Massachusetts. Academic Press, 1980. 413p.

HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Amsterdam, v.11, n.1, p.53-71, 1988.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1-2, p.23-36, 1995.

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

IVO, W.M. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo de tabuleiro costeiro. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS. **Anais...** Aracaju: Embrapa – Tabuleiros Costeiros, p.101-114. 1999.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.845-855, 2009.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

KERTZMAN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação**. 132p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 1996.

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

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 130p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP. 1998.

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

LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. **Theoretical Evaluation on the Feasibility of Controlled-Traffic Farming (CTF). Using Wide-Span Implement Carriers (WSIC) for Canadian Agriculture**. CSAE - Paper N° 03-233. Montréal, Québec, Canada: CSAE/SCGR. 2003.

LAL, R. Tillage and agricultural sustainability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, n.1, p.133-146, 1991.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOEW, E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.1, p.151-170, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.6, p.649-654, 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.1, p.415-423, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advison Soil Science**, New York, v.1, n.1, p.227-294, 1985.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.945-951, 2004.

LIPIEC, J.; ISHIOKA, T.; HATANO, R.; SAKUMA, T. Effects of soil structural discontinuity on root and shoot growth and water use of maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.157, n.1, p.65-74, 1993.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.163-170, 2006.

MENDONZA, H.N.S.; LIMA E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.201-207, 2000.

MEROTTO, A.J.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.1, p.197-202, 1999.

McPHEE, J.E.; BRAUNACK, M.V.; GARSIDE, A.L; REID, D.J.; HILTON, D.J. Controlled traffic for irrigated double cropping in semi-arid tropical environment: Part 2, tillage operations and energy use. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.60, n.1, p.183-189, 1995.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Tráfego controlado na mecanização da cana-de-açúcar. In: WORKSHOP INTERNACIONAL BRASIL-JAPÃO EM BIOCOMBUSTÍVEL, MEIO AMBIENTE E NOVOS PRODUTOS DA BIOMASSA, 05, 2007. **Anais...** Campinas: Unicamp. Disponível em <<http://www.cori.unicamp.br>>. Acesso em 19 de novembro de 2010, 2007.

NOVAK, L.R.; MONTOVANI, 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.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.76, n.1, p.319-337, 1984.

OLIVEIRA, J.C.M.; VAZ, C.M.P.; REICHARDT, K. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, n.1, p.50-55, 1995.

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

PEDROTTI, A.; DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo: Como evitá-la. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.9, n.4, p.50-52, 1996.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; PRADO, H.; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.1, p.49-55, 1998.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.Q.; NOGUEIRA, S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.929-38, 2000.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v.42, n.3, p.259-280, 2005.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1, p.61-76, 2003.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.3, p.211-216, 1988.

SALVADOR, N. **Consumo de energia na operação de subsolagem realizada antes e depois de sistemas de preparo periódico do solo**. 166p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1992.

SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.31, n.2-3, p.235-248, 1994.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.797-804, 2004.

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.1, p.1419-1427, 2008.

SEWELL, A.J.; YULE, I.J. **Multirole power units: farm equipment of the future?** ASAE Paper N. 96-1052. St. Joseph, MI, USA: ASAE. 1996.

SHAVER, T.M.; PETERSON, L.R.; AHUJA, L.R.; WESTFALL, D.G.; SHERROD, L.A.; DUNN, G. Surface soil physical properties after twelve years of dryland no-till management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, n.1, p.1296-1303, 2002.

SHINITZER, M. Soil organic matter: the next 75 years. **Soil Science**, Baltimore, v.151, n.1, p.41-58, 1991.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.877-883, 1997.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.113-117, 1997.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.4, p.677-684, 1997.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, n.2, p.239-249, 2000.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, 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, 2003.

SILVA, L.F.S. **Aplicação do intervalo hídrico ótimo no monitoramento da qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico típico**. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SINGER, M.J.; EWING, S. Soil quality. In: SUMMER, M.E. (ed). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, Section G, p.271-298, 2000.

SPERA, S. T.; REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SILVA, J. C. S. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro no cerrado de Planaltina, DF, submetido à ação do fogo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1817-1824, 2000.

SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.25, n.1, p.27-34, 2003.

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.

SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, Jaboticabal, v.34, n.1, p.31-38, 2006a.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.487-492, 2006b.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, F.J.P. Características físico-hídricas e químicas de um latossolo após adubação e cultivos sucessivos de arroz e feijão, sob irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.3, p.533-539, 1994.

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.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações das 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.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A.A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.487-494, 2008.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.33, n.1, p.141-163, 1982.

TOPP, E.; VALLAEYS, T.; SOULAS, G. Pesticides: microbial degradation and effects on microorganisms. In: VAN ELSAS, J.D.; TREVORS, J.T.; WELLINGTON, E.M.H. (Ed.). **Modern soil microbiology**. New York: Marcel Dekker, 1997. p.547-575.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular técnica, 23).

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.4, p.573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C.; DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, n.1, p.56-60, 2008.

TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L.F.C. Tráfego controlado: Pneus e Compactação. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.41, n.1, p.22-25, 2005.

TULLBERG, J.N. Tractor-based systems for traffic control in Australia. **Landwards**, London, v.52, n.4, p.12-15, 1997.

TULLBERG, J.N. Wheel traffic effects on tillage draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v.75, n.4, p.375-382, 2000.

VAN GENUCHTEN, M.T.H. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, n.1, p.892-898, 1980.

VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo sob diferentes sistemas de manejo, estimado por métodos de fumigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.411-417, 1998.

VASCONCELOS, A.C.M.; DINARDO-MIRANDA, L.L. **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides**. Americana: Adonis, 2006. 56p.

VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M.van; WILIGEN, P.; BOONE, F.R.; KOOISTRA, M.J. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. III. Effects on shoot growth, nitrate and water uptake efficiency. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.139, n.1, p.131-138, 1992.

VOORHEES, W.B.; SENST, C.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, n.1, p.344-349, 1978.

VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, n.1, p.428-433, 1986.

WAY, T.R.; BAILEY, A.C.; RAPER, R.L.; BURT, E.C. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. **American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.38, n.3, p.669-674, 1995.

WOOD, R.K.; REEDER, R.C.; MORGAN, M.T.; HOLMES, R.G. Soil physical properties as affected grain cart traffic. **American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.36, n.1, p.11-14, 1993.

XU, X.; NIEBER, J.L.; GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, n.6, p.1743-50, 1992.

ZIMBACK, C.R.L. **Levantamento semidetalhado e caracterização hídrica de solos provenientes do grupo bauru, em duas bacias hidrográficas, na região de Marília-SP**. 184p. Tese (Doutorado em Agronomia) Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1993.

10. ANEXOS

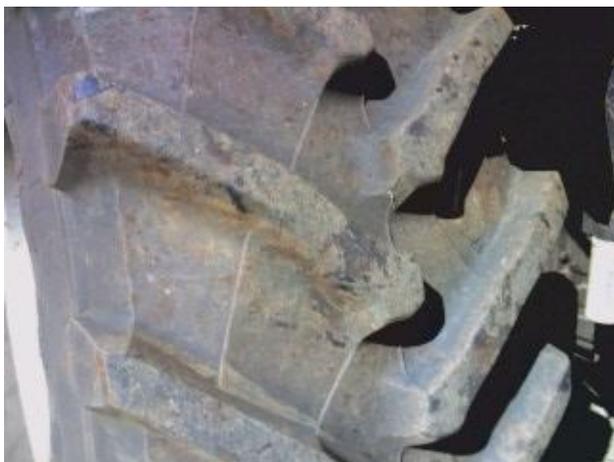


Figura 15. Pneu traseiro do trator – Trelleborg
TM900 650/85 R38



Figura 16. Pneu dianteiro de trator – Trelleborg
TM900 600/70 R30



Figura 17. Esteira da colhedora vista de frente



Figura 18. Colhedora de cana-de-açúcar



Figura 19. Detalhe do aumento da bitola do eixo
dianteiro do trator



Figura 20. Detalhe do aumento da bitola do eixo
traseiro do trator