

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO EM  
LATOSSOLO VERMELHO APÓS SUCESSIVOS CORTES  
MECANIZADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**Danilo Baldan Rossini  
Engenheiro Agrônomo**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO EM  
LATOSSOLO VERMELHO APÓS SUCESSIVOS CORTES  
MECANIZADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**Danilo Baldan Rossini**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani  
Coorientador: David Luciano Rosalen**

**Dissertação apresentada à Faculdade  
de Ciências Agrárias e Veterinárias -  
UNESP, Campus de Jaboticabal,  
como parte das exigências para a  
obtenção do título de Mestre em  
Agronomia (Produção Vegetal).**

**2014**

Rossini, Danilo Baldan  
R835r Resistência mecânica à penetração em latossolo vermelho após  
sucessivos cortes mecanizados de cana-de-açúcar / Danilo Baldan  
Rossini. -- Jaboticabal, 2014  
xi, 69 p. ; il. 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Banca examinadora: Rouverson Pereira da Silva, Denizart  
Bolonhezi

Bibliografia

1. Compactação. 2. Índice de cone. 3. Penetrômetro. 4. *Saccharum  
officinarum*. I. Título. II. Jaboticabal - Faculdade de Ciências Agrárias  
e Veterinárias.

CDU 631.431.7:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO EM LATOSSOLO VERMELHO APÓS SUCESSIVOS CORTES MECANIZADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR

**AUTOR:** DANILO BALDAN ROSSINI

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. DAVID LUCIANO ROSALEN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. ROUVERSON PEREIRA DA SILVA

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. DENIZART BOLONHEZI

Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios / Ribeirão Preto/SP

Data da realização: 08 de julho de 2014.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**DANILO BALDAN ROSSINI** – Nascido dia 25 de Agosto de 1988, em Matão – SP. Em fevereiro de 2007, ingressou no Curso de Graduação em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista – Unesp Campus de Jaboticabal, e em fevereiro de 2011, obteve o título de Engenheiro Agrônomo. Foi bolsista de Iniciação Científica pelo programa PIBIC/CNPq durante o período de 2008 a 2010. Iniciou em fevereiro de 2012 o curso de Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Universidade Estadual Paulista – Campus de Jaboticabal, SP, onde foi bolsista CAPES. Paralelamente ao curso de mestrado ingressou em uma empresa privada do ramo de pneus agrícolas localizada em Ribeirão Preto – SP, onde atua na área de Pesquisa & Desenvolvimento com foco em máquinas e operações agrícolas e a compactação do solo.

Aos meus pais Dante Rossini Junior e Sandra Elisa Baldan

**Dedico**

À minha amada esposa Helena Petroni Galli Crestana Rossini

**Ofereço**

## **AGRADECIMENTOS**

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP – Jaboticabal e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa no primeiro semestre.

Ao Professor Carlos Eduardo Angeli Furlani pela orientação, ensinamentos e paciência nos anos de orientação em minhas atividades no Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícolas (LAMMA).

Ao Professor Rouverson Pereira da Silva por todo apoio durante o curso e pela participação na banca de defesa, contribuindo para engrandecer e melhorar minha dissertação com suas correções e sugestões valiosas.

Ao Dr. Denizart Bolonhezi pela valiosa participação na banca de defesa e pela constante participação e apoio em minha jornada acadêmica e pessoal, por toda sua atenção e amizade.

À minha esposa Helena P. G. Crestana Rossini por todo seu amor, pelas sugestões, compreensão e por sempre ficar ao meu lado nos maiores desafios e nunca me deixar desistir.

Aos meus pais, Sandra Elisa Baldan e Dante Rossini Junior por serem meus exemplos de vida, e pelo empenho em me apoiar a manter o foco em busca do meu objetivo e dentro de princípios dignos.

À todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Rural da FCAV, pelos ensinamentos, amizade e companhia, em especial para o Professor David L. Rosalen pela coorientação e à equipe do LAMMA pelo apoio nas atividades de campo e desenvolvimento dos trabalhos.

À empresa DLG Automação Industrial LTDA.

Ao Engenheiro Agrônomo Alysson Guilherme Strack, José Roberto, Paulo de Araújo Rodrigues, Professor Roberto Rodrigues e a todos os funcionários do Condomínio Agrícola Santa Izabel pelo fornecimento da área para realização do experimento, pelo apoio pessoal e a toda atenção dedicada em nos receber e fornecer todas informações necessárias para a realização do trabalho.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	x
SUMMARY .....	xi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Solo.....	3
2.1.1 Compactação do solo.....	4
2.1.2 Resistência Mecânica do Solo à Penetração .....	7
2.2 Penetrômetros e penetrometria .....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Tratamentos.....	14
3.2 Regiões amostrais e camadas avaliadas.....	15
3.3 Área Experimental .....	17
3.4 Operações mecanizadas .....	19
3.5 Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP).....	22
3.5.1 Penetrômetro .....	22
3.5.2 Amostragem da RMSP.....	23
3.5.2.1. Amostragem após o corte de 2009.....	26
3.5.2.2. Amostragem após o corte de 2010.....	26
3.5.2.3. Amostragem após o corte de 2011.....	27
3.5.2.4. Amostragem após o corte de 2012.....	27
3.6 Teor de água ou umidade gravimétrica do solo.....	29
3.7 Análise Estatística .....	29
3.8 Distribuição espacial da RMSP.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Histórico de produtividade das áreas experimentais .....	32



4.2 Teor de água do solo .....	33
4.3 Resistência Mecânica do Solo à Penetração.....	35
4.3.1 Comparação entre cortes .....	35
4.3.2 Variação no perfil .....	41
4.3.3 Distribuição espacial da RMSP .....	52
5 CONCLUSÕES .....	59
6 REFERÊNCIAS.....	60

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
1. Caracterização dos tratamentos.....	15
2. Caracterização dos talhões. ....	17
3. Descrição das máquinas utilizadas no sistema de colheita e cultivo.....	21
4. Tráfego acumulado e carga total equivalente para cada faixa de tráfego (FR) de acordo com o ciclo (número de corte). ....	22
5. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2009.....	28
6. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2010*. ....	28
7. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2011*. ....	28
8. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2012*. ....	28
9. Número de corte (ciclo) das áreas amostrais nas últimas dez safras até 2014. ....	32
10. Histórico de produtividade dos cortes no período de 2004 a 2014.....	32
11. Teste de média do teor de água do solo para profundidade 0 - 50 cm nos tratamentos C3, C5 e C6 nos quatro* anos de avaliação.....	33
12. Teste de média para valores de teor de água no perfil do solo avaliado nos tratamentos C3, C5 e C6 para os quatro* anos de avaliação.....	34

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Esquema representativo das regiões e profundidade de amostragem da RMSP. Faixa dos rodados (FR) e da fileira de cana (FC). .....	15
2. Esquema representativo das regiões de amostragem em relação à faixa de passagem dos rodados (FR) e da fileira de cana (FC).....	16
3. Mapa da Fazenda Santa Izabel e Fazenda Bela Vista – Talhões utilizados na pesquisa.....	18
4. Posição topográfica dos talhões considerando o relevo em larga escala e perfil de elevação.....	18
5. Precipitação registrada nos anos de 2009 a 2012. (Fonte: INMET).....	20
6. Penetrômetro eletrônico modelo PNT-2000/MOTOR.....	23
7. Vista geral do PNT-Titan e detalhamento do penetrômetro. ....	24
8. Sequência de amostragem realizada no tratamento C6 na avaliação após o corte de 2011. ....	25
9. Diagrama de caixa e teste de médias para valores de RMSP juntamente com respectivas médias do teor de água do solo, para camada 1-50 cm de cada tratamento em cada ano de avaliação na região faixa do rodado (FR).....	37
10. Diagrama de caixa e teste de médias para valores de RMSP juntamente com respectivas médias do teor de água do solo, para camada 1-50 cm de cada tratamento em cada ano de avaliação na região fileira de cana (FC). ....	37
11. Valores médios de RMSP na fileira de cana (FC) e teor de água (%) em relação à produtividade obtida em cada tratamento na safra do ano seguinte ao de cada amostragem.....	40

12. Estatística descritiva e análise de variância dos valores de RMSP entre as camadas avaliadas de cada região amostral FR (a, c, e) e FC (b, d, f) para o tratamento C3 na safra 2008/09 (a, b), 2009/10 (c, d) e 2010/11 (e, f). .....	42
13. Estatística descritiva e análise de variância dos valores de RMSP entre as camadas avaliadas de cada região amostral FR (a, c, e) e FC (b, d, f) para o tratamento C5 na safra 2008/09 (a, b), 2009/10 (c, d) e 2010/11 (e, f). .....	43
14. Estatística descritiva e análise de variância dos valores de RMSP entre as camadas avaliadas de cada região amostral FR (a, c, e) e FC (b, d, f) para o tratamento C6 na safra 2008/09 (a, b), 2009/10 (c, d) e 2010/11 (e, f). .....	44
15. Valores médios da RMSP a cada 1 cm de profundidade na região FR e FC do tratamento C3 nos 4 anos de avaliação. ....	48
16. Valores médios da RMSP a cada 1 cm de profundidade na região FR e FC do tratamento C5 nos 3 anos de avaliação. ....	49
17. Valores médios da RMSP a cada 1 cm de profundidade na região FR e FC do tratamento C6 nos 3 anos de avaliação. ....	50
18. Vértices amostrais para coleta de dados de RMSP no tratamento C3 nos quatro anos de avaliação: (a) 2009; (b) 2010; (c) 2011; (d) 2012. ....	52
19. Mapas da variabilidade espacial da RMSP (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2009. ...	54
20. Mapas da variabilidade espacial da RMSP (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2010. ...	54
21. Mapas da variabilidade espacial da RMSP (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2011. ...	55
22. Mapas da variabilidade espacial da RMSP (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2012. ...	55

## RESISTÊNCIA MECÂNICA À PENETRAÇÃO EM LATOSSOLO VERMELHO APÓS SUCESSIVOS CORTES MECANIZADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR

**RESUMO** – Considerando a importância da cultura de cana-de-açúcar e a intensificação do tráfego de máquinas, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) para comparar o nível de compactação do solo em relação ao número de corte do talhão. As medições de RMSP foram realizadas após a colheita mecanizada e repetidas por quatro anos em três talhões cultivados com a variedade SP 87-365, localizados na fazenda Santa Izabel, região de Jaboticabal, São Paulo. Foi utilizado o penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo para medir a RMSP até 50 cm de profundidade em duas regiões, uma próxima à soqueira ou fileira de cana (FC) e outra no centro da entrefileira ou faixa dos rodados (FR). A partir dos dados georreferenciados foram gerados mapas de espacialização da RMSP média das camadas de 1-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm de profundidade que permitiram visualizar a distribuição espacial dos valores de RMSP e estimar os níveis de compactação de cada tratamento e de cada camada do perfil do solo amostrado. Os valores médios de RMSP obtidos variaram entre os tratamentos sem seguir uma ordem definida pelo número de cortes, podendo ter sido influenciado pelo teor de água do solo. Ocorreu predominância de valores médios entre 2 e 3 MPa. Quanto à distribuição vertical no perfil do solo, os valores de RMSP foram menores na camada superficial em ambas regiões, aumentando conforme a profundidade em FC, com maiores níveis na camada de 41-50 cm. Em FR os valores maiores ficaram na camada de 11-20 cm. Pôde-se concluir que o tráfego de máquinas causou alterações na RMSP.

**Palavras-Chave:** compactação, índice de cone, penetrômetro, *Sacharum officinarum*.

## SOIL RESISTANCE TO PENETRATION IN RED LATOSOL AFTER SUCESSIVE MECHANIZED HARVEST OF SUGARCANE

**SUMMARY** - Considering the importance of sugarcane production and the intensification of machinery traffic, the aim of this study was evaluate soil mechanical resistance to penetration (SMRP) to compare the level of soil compaction in relation to ratoon cycle. The assessments of RMSP were performed after mechanical harvesting and repeated for four years in three areas cultivated with variety SP 87-365, located at Santa Izabel farm, Jaboticabal, São Paulo. An electronic penetrometer coupled to an ATV was used to measure SMRP up to 50 cm depth in two regions, near ratoon or crop row (FC) and at center of inter-row or traffic track (FR). From georeferenced data it was generated maps of spatial variability of SMRP to layers 1-10, 11-20, 21-30, 31-40 and 41-50 cm of depth that allowed visualization of the spatial distribution of SMRP values and estimate levels of compaction of each treatment and each layer in the soil profile sampled. The average SMRP values obtained varied between treatments without following a defined order according to harvest cycle and may have been influenced by the water content of the soil. There was a predominance of average values between 2 and 3 MPa. Regarding the vertical distribution in soil profile, the values of SMRP were lower in the surface layer in both regions, increasing with depth in FC, with higher levels in the 41-50 cm layer. At FR, values were higher in the 11-20 cm layer. It could be concluded that the traffic of machines caused changes in the MRSP.

**Keywords:** compaction, cone index, penetrometer, *Sacharum officinarum*.

## 1 INTRODUÇÃO

Maior produtor mundial de cana-de-açúcar, o Brasil teve produção nacional de 658,8 milhões de toneladas na safra 2013/14, distribuída em área de 8,81 milhões de hectares que representa produtividade média de 74.769 kg ha<sup>-1</sup>. O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional com 51,7% da área produzida (4.552 mil hectares) (CONAB, 2014).

A mecanização das operações agrícolas da cultura da cana-de-açúcar é decorrente principalmente da necessidade de manejo em larga escala das extensas áreas produtivas. Tal fato torna-se ainda mais evidente para a colheita mecanizada, que intensificou ainda mais sua adoção após a criação de leis que preveem a proibição da queimada usada no corte manual.

O balanço da safra 2012/2013 divulgado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo aponta que da área total colhida no estado, 72,5 % foi por meio da colheita mecanizada de cana crua (SMA, 2014).

O intenso tráfego de máquinas e equipamentos cada vez mais pesados, levanta preocupação dos produtores quanto aos efeitos à estrutura física do solo e possíveis prejuízos à lavoura. Vários autores atribuem o efeito do tráfego intenso ao aumento da compactação do solo, que pode promover perda de produtividade devido à limitação da infiltração de água, trocas gasosas entre raiz - solo - atmosfera e do desenvolvimento das raízes das plantas.

Avanços tecnológicos na agropecuária têm mostrado a importância de se medir a variação espacial e temporal de propriedades que afetam o rendimento das culturas, com o objetivo de otimizar o aproveitamento de recursos e diminuir custos, abordando o que se convencionou chamar de Agricultura de Precisão.

A detecção das camadas compactadas é necessária para se obter o correto trabalho dos equipamentos de mobilização visando o preparo do solo. Uma regulagem feita sem o conhecimento desse parâmetro pode ocasionar em gasto desnecessário de energia e ainda ineficiência da operação, o que representa o não retorno do investimento e, em alguns casos, pode ocasionar problemas mais agravados como o pé-de-grade por exemplo.

Existem várias técnicas utilizadas para se detectar a compactação do solo como, por exemplo, a macroporosidade, densidade, velocidade de infiltração da água e a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP). Dentre elas, a RMSP apresenta correlação direta com o crescimento das raízes das plantas e, além disto, é mensurada por meio da penetrometria.

O método da penetrometria proporciona o equilíbrio entre agilidade e confiabilidade para a identificação da compactação, que é característica de cada tipo de solo e seu teor de água, e contribui para representar a condição física do mesmo.

Em virtude da característica semiperene da cultura, o solo cultivado com cana-de-açúcar pode ficar mais de cinco anos sob tráfego intenso de máquinas agrícolas pesadas, sem ser preparado e descompactado até o momento da reforma.

Com base no exposto, considera-se que o tráfego de máquinas agrícolas em talhões de cana possa ocasionar mudanças nas propriedades físico-mecânicas do solo, que vão acumulando a cada ciclo até a reforma, devendo variar proporcionalmente ao número de corte do talhão.

O presente trabalho considerou a hipótese de que quanto maior o número de cortes, maior o nível de resistência mecânica do solo à penetração (RMSP).

O objetivo principal foi avaliar a RMSP em três talhões de cana-de-açúcar por três anos, abrangendo do 3º ao 8º corte. Também foi analisado o efeito do tráfego controlado avaliando os níveis de RMSP em duas regiões amostrais: faixa de tráfego dos rodados (FR) e fileira de cana (FC). Outro objetivo foi gerar mapas que permitam visualizar e analisar a variabilidade espacial dos valores de RMSP.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Solo

O solo é uma coleção de corpos naturais, dinâmicos, tridimensional e constituído por fase sólida, líquida e gasosa. Formados por material mineral e orgânico contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem, ocupando a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta e passíveis de serem modificados por interferências antrópicas (SANTOS et al., 2006; SCHNEIDER et al., 2007).

A textura é a proporção relativa das partículas primárias que constituem a fase sólida do solo. As frações texturais são classificadas em grupos de tamanho, tomando como base o diâmetro equivalente e são denominadas areia, silte e argila. As proporções dessas partículas do solo não estão sujeitas a mudança rápida no tempo abrangido por uma geração. A textura é uma característica do solo, que determina inclusive seu valor econômico (REICHARDT; TIMM, 2004; RESENDE et al., 2007)

Segundo Reichardt e Timm (2004), a fração argila é a que mais decisivamente determina seu comportamento físico, sendo a fração mais ativa em processos físicos e químicos que ocorrem no solo. Propriedades do solo como contração, expansão, plasticidade, capacidade de retenção de água, resistência do solo e adsorção de elementos químicos são dependentes do tipo e da quantidade de argila presente no solo (BRADY; WEIL, 2008).

Resende et al. (2007) explicam que as partículas primárias do solo geralmente se encontram agrupadas em unidades maiores, formando a estrutura do solo. Para Brady e Weil (2008), a estrutura do solo refere-se ao arranjo das partículas primárias do solo em agregados ou unidades estruturais. Conforme citado por Marcolin (2009), a estrutura define a disposição dos poros e agregados, a qual possui grande influência sobre movimento de água, transferência de calor, aeração e porosidade. Desmatamento, aração, cultivo, tráfego, drenagem, calagem e adição de material orgânico, são exemplos de

práticas que afetam diretamente a estrutura do solo, principalmente nos horizontes superficiais.

A matéria orgânica no solo é a parte da fração sólida constituída de compostos orgânicos de origem vegetal ou animal que se encontram em diversos graus de transformação (REICHARDT; TIMM, 2004).

A principal propriedade física do solo na qual a matéria orgânica interfere é na agregação. A partir desse efeito, indiretamente são afetadas as demais propriedades físicas do solo, como a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

### **2.1.1 Compactação do solo**

Nas últimas décadas a mecanização das operações agrícolas tem-se intensificado (HORN et al., 2000), com o uso de máquinas e implementos agrícolas em todas as etapas do processo produtivo em agrossistemas canavieiros (PAULINO et al., 2004), sendo observado a adoção de veículos de maior capacidade unitária de carga, os quais, muitas vezes, trafegam sobre o solo em condições desfavoráveis em termos de conteúdo de água, o que tem colaborado para a degradação física, tanto em superfície como em subsuperfície (HORN et al., 2000; IAIA et al., 2006;), sendo a compactação o problema considerado um dos principais fatores de degradação da estrutura do solo (MOSADDEGHI et al., 2007).

Considerando a tendência de disponibilização de matéria prima da produção agrícola através da redução do período da entressafra da cultura da cana-de-açúcar, Severiano et al. (2010) comentam que a degradação física do solo pode ser agravada pela colheita mecanizada durante a estação chuvosa na região Centro-Sul do Brasil.

Dessa forma, monitorar a compactação do solo é de fundamental importância na manutenção da longevidade dos canaviais (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006).

As alterações físicas do solo devido ao tráfego de máquinas e implementos têm sido amplamente estudadas (HORN et al., 2003; SCHÄFFER-LANDEFELD et al., 2004; YAVUSCAN et al., 2005; CHAN et al., 2006; SCHÄFFER et al., 2007) pelo fato de a compactação ser um sério problema para os solos agrícolas. Desta forma também se busca medidas que permitam a comparação entre os diferentes solos (ALMEIDA et al., 2008).

A compactação refere-se à compressão em estado não saturado do solo durante a qual existe aumento de sua densidade em consequência da redução de seu volume, pela redução da porosidade total do solo, principalmente dos poros ocupados por ar. Quando o fenômeno de redução de volume ocorre por processos pedogenéticos, este fenômeno denomina-se adensamento (BELTRAME; TAYLOR, 1980; DIAS JUNIOR, 2000; DEXTER & CZYZ, 2007; GUPTA; ALLMARAS, 1987).

Define-se assim compactação do solo como aumento da concentração de massa por deslocamento indiscriminado das partículas a partir de processo mecânico não originário do próprio solo. A compactação envolve alteração na estrutura física, havendo rearranjo e aproximação das partículas sólidas do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997; GREACEN; SANDS, 1980; RÍPOLI, 1985; SEIXAS, 1996).

Segundo Horn et al., (1995) o processo de compactação pode ser atribuído tanto à diminuição do espaço poroso entre os agregados, onde há um rearranjo destes na matriz do solo, como à ruptura e destruição destes agregados, ocasionando rearranjo e orientação das partículas, o que resulta numa massa coesa na matriz do solo.

Portanto, a compactação do solo pode ser causada pela reação do solo à pressões e cargas impostas por rodas, esteiras, ferramentas de mobilização e pisoteio de animais, como citam VandenBerg e Gill (1968) e Chancellor (1977). Outra forma de compactação pode ocorrer por características naturais do solo como o movimento de partículas de argila por processos pedogenéticos acelerados, formando camadas mais densas, que neste caso é classificado como adensamento (RÍPOLI, 1985).

Os fatores que interferem na compactação são classificados em duas categorias, sendo uma intrínseca às características do solo, como teor de água, textura, densidade inicial do solo, recalque, quantidade e distribuição de matéria orgânica incorporada e em cobertura, e a outra referente à magnitude e natureza da força compactante, que seriam características das máquinas que podem influenciar na compactação, como tipos de rodados, pressão de contato, dimensões dos pneus, pressão de inflagem e intensidade de tráfego (OLIVEIRA JÚNIOR, 1998; STONE; EKWUE, 1995).

Para Håkansson (1990) fatores relacionados com as máquinas agrícolas, como pneus estreitos ou com elevada pressão de inflação e alta carga por eixo, causam o aumento da compactação do solo.

As distribuições das pressões decorrentes da carga mecânica aplicada sobre solo e sua respectiva compressibilidade determinam o tipo e a intensidade da deformação ocasionada (HORN et al., 1995). Esses fatores são os responsáveis pelos diferentes níveis de compactação encontrados nos solos agrícolas (CAVALIERI, 2009)

A aplicação de cargas por rodados ou implementos agrícolas exerce tensões na região de contato, compactando o solo em diferentes camadas (HORN; LEBERT, 1994; HORN et al., 2003) e, caso essas tensões excedam à resistência interna do solo, ocorrerão mudanças nos atributos físicos (BONINI, 2006).

Horn e Lebert (1994) acrescentam que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas provocadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento.

De acordo com Horn et al. (2003), quanto mais o solo é trafegado, mais intenso é o rearranjo dos agregados do solo ou partículas, computando que os efeitos de cada passada de uma máquina pesada podem provocar mudanças aditivas ao solo (SCHAFER-LANDEFELD et al., 2004).

Neste sentido, Bonini (2006) avaliando a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em quatro estados de compactação, na fase pós-colheita da cultura do trigo, encontrou que houve aumento da RMSP de acordo com o número de passadas do rolo compactador, concluindo que o maior estado de

compactação observado nos tratamentos se deve ao efeito acumulativo de pressões de máquinas ou implementos que o solo recebe em uma safra ou de uma safra para outra, além de ter a acomodação natural das partículas mais finas pelo perfil do solo com o passar do tempo, que podem diretamente influenciar o aumento dos valores da RMSP.

Por ser um processo em que há redução da porosidade total e permeabilidade, aumento da resistência mecânica à penetração e densidade do solo (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994), a compactação pode provocar restrição ao crescimento radicular, afetar a infiltração e a condutividade hidráulica, além de promover alterações nos processos químicos e biológicos no solo (CAMARGO ; ALLEONI, 1997; TAVARES FILHO et al., 2001; STRECK et al., 2004).

A análise das modificações na estrutura do solo decorrentes da compactação pode ser feita por propriedades físicas do solo que traduzem as modificações na distribuição das partículas ou agregados e conseqüentemente do tamanho de poros. As propriedades físicas do solo mais freqüentemente utilizadas nestes estudos são a densidade do solo, a porosidade do solo, a resistência mecânica do solo à penetração, a condutividade hidráulica, a permeabilidade do solo ao ar entre outros (SCHAFER-LANDEFELD et al., 2004; YAVUSCAN et al., 2005; SWEENEY et al., 2006).

### **2.1.2 Resistência Mecânica do Solo à Penetração**

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) tem sido utilizada, ao longo de muitos anos, com inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônômica, sendo várias já consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas; estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo; prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas; predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento (CUNHA et al., 2002).

A RMSP é uma propriedade do solo adotada como indicativo da compactação, por apresentar forte relação com o crescimento radicular das plantas (LETEY, 1991; PEDROTTI et al., 2001; BEUTLER et al., 2002) e por ser muito eficiente na identificação de estados de compactação, quando comparada à densidade do solo (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000; FREDDI et al., 2006; STONE et al., 2002) além de ser de fácil e rápida determinação (MERCANTE et al., 2003; TORMENA; ROLOFF, 1996).

Rosolem (1994) observou que a raiz não responde à compactação do solo, mas sim a RMSP, da qual a compactação é um dos fatores.

A compactação do solo diminui o número de poros grandes e, dessa maneira, para que as raízes consigam penetrar têm que exercer uma força para deslocar as partículas do solo. O aumento do estado de compactação do solo resulta em aumento da resistência à penetração das raízes. O limite crítico de resistência depende da espécie de planta utilizada, teor de água e textura do solo, portanto, o sistema radicular das culturas apresenta diferentes graus de tolerância à compactação (GIMENEZ et al., 1997).

A RMSP, além da dependência de fatores intrínsecos do solo como textura e mineralogia, é altamente dependente do teor de água do solo (GOMES & PEÑA, 1996). Em condição de baixo teor de água, a água encontra-se num maior estado de tensão nos poros do solo. Além dessa tensão, somam-se as forças de coesão e de adesão já existentes entre os sólidos do solo, resultando em maior resistência à deformação ou à penetração de raízes numa condição de baixo teor de água. Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, provocando, então, a diminuição da RMSP (CUNHA et al., 2002).

Além disso, a resistência também está associada à característica estrutural dos agregados, sendo que a porosidade estrutural do solo é a melhor variável para explicar que a resistência depende da estrutura e do teor de água do solo (GONZALEZ, 1991).

Contudo, Tavares Filho et al. (2001), estudando Latossolo Roxo argiloso, verificaram que os valores de resistência do solo à penetração no plantio direto foram mais afetados pela distribuição estrutural do que pelo teor de água do solo.

Os autores mostraram também que valores de resistência apresentados na literatura como restritivos ao desenvolvimento radicular (1-3,5 MPa), não restringiram o desenvolvimento radicular do milho.

Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam de 1 a 4 MPa e estão relacionados com o tipo de solo, teores de água e com a espécie cultivada (CANARACHE, 1990; MEROTTO JÚNIOR; MUNDSTOCK, 1999).

Muitos pesquisadores, contudo, utilizam o valor de 2 MPa como o limite crítico, no entanto, o valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas ainda é muito discutido, pois depende da densidade do solo, textura, tipo do sistema radicular, teor de água, entre outros fatores que direta ou indiretamente podem influenciar a resistência do solo (BONINI, 2006).

Apesar de a RMSP ser afetada pela textura, pela densidade do solo e pelo teor de água, Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes da maioria das plantas. Segundo Beutler et al. (2006), valores de 2,0 a 3,0 MPa são limitantes à produtividade de soja, enquanto Merotto e Mundstock (1999) indicam que RMSP maior que 3,5 MPa causa severa limitação ao crescimento de plantas de trigo. Segundo Rosolem et al. (1999), a RMSP da ordem de 1,3 MPa reduz à metade o crescimento das raízes seminais adventícias do milho. Torres e Saraiva (1999), em experimentos com soja em Latossolo Roxo, observaram valores de resistência em torno de 3,5 a 6,5 MPa (solo na consistência friável) como causadores de possíveis problemas de impedimento mecânico.

Koolen e Kuippers (1983) relatam a redução drástica de raízes com valores de RMSP superiores a 3 MPa. Canarache (1990) sugere valores acima de 2,5 MPa e SENE et al. (1985) consideram críticos valores de 6,0 a 7,0 MPa para solos arenosos e de 2,5 MPa para argilosos.

Segundo Arshad et al. (1996) citado por Roque et al. (2003) em solos não mobilizados anualmente, como é o caso da cana-de-açúcar, os valores médios entre 2 e 4 MPa não são impeditivos ao crescimento radicular, afirmando que são toleráveis valores até 4 MPa.

Segundo Klein et al. (1998), Torres e Saraiva (1999) e Pereira et al. (2002), em condições de solo com alto teor de água, regiões compactadas não são detectadas. Em condições de campo, a condição de teor de água dentro do intervalo plástico é mantida apenas por um curto período de tempo, de modo que a resistência aumenta com a secagem do solo, e em períodos de déficit hídrico poderão ocorrer impedimentos à penetração de raízes.

Quando se compara a RMSP em diferentes sistemas de manejo, a presença ou ausência de diferenças entre os sistemas podem ser confundidas com as influências desses sobre o teor de água do solo (CHANCELLOR, 1977). Dessa forma, é importante o controle do teor de água na determinação da RMSP, permitindo, assim, evidenciar os efeitos dos sistemas de manejo sobre a estrutura do solo.

Segundo Acosta (2007) o conhecimento da resistência a penetração existente em cada talhão promoveria a informação específica das práticas de manejo utilizadas em cada área. Desta forma garantiria menor impacto às propriedades físicas dos solos aonde as práticas seriam desnecessárias e, ainda, uma economia de combustíveis no caso da não recomendação do manejo destas.

## **2.2 Penetrômetros e penetrometria**

No caso da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP), utiliza-se um equipamento composto por uma haste com ponteira cônica denominado penetrômetro (CARBONERA, 2007). A RMSP mensurada através da penetrometria (BENGOUGH; MULLINS, 1990; TORMENA; ROLOFF, 1996) é determinada pelo índice de cone (IC), definido como a força de resistência do solo à penetração do cone de ângulo sólido de 30° com área basal conhecida, sendo expresso em unidade de pressão (Pascal ou Pa) que representa a força por unidade de área da base do cone (CUNHA et. Al., 2002; ALMEIDA et al., 2008).



Esse método apresenta algumas vantagens por ser rápido, fácil e possuir boa correlação com o desenvolvimento radicular das plantas (BENGOUGH et al., 2001).

Entretanto, esse índice, normalizado pela ASAE (1998), apresenta grandes variações em função das propriedades do solo, tais como teor de água, textura e densidade. Apesar de muitos estudos terem sido feitos, não se tem uma quantificação, universalmente aceita, da influência de uma determinada variação no teor de água sobre a resistência à penetração para diferentes solos, ou seja, se esta resistência varia linearmente, ou não, em função de iguais acréscimos no teor de água. Ainda, se estes acréscimos influenciam o coeficiente de variação dos dados de resistência, obtidos na caracterização de um determinado solo (CUNHA et al., 2002).

Torres e Saraiva (1999) ressaltam que o penetrômetro é um instrumento importante na avaliação da compactação do solo, porém os resultados obtidos por meio dele devem ser inseridos em um contexto maior de avaliação da compactação, contemplando, além do uso correto do equipamento, o histórico de produtividade da propriedade em diferentes glebas e abertura de trincheiras para a verificação do sistema radicular.

A preferência em utilizar penetrômetros para medir o estado de compactação está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Ainda, os penetrômetros medem a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade e os valores de resistência à penetração são positivamente correlacionados com a densidade do solo (SILVA et al., 2004).

As diferenças entre os penetrômetros e o sistema radicular dificultam o estabelecimento de boa correlação entre a pressão exercida pelas raízes e a RMSP medida no mesmo local com o penetrômetro (ASSIS, 2009). Segundo Bengough e Mullins (1990), numa mesma condição de solo, a RMSP avaliada pelo penetrômetro pode resultar em valores de 2 até 8 vezes mais elevados que as pressões exercidas pelas raízes, devido às diferenças no desenho, rigidez e dimensões (MISRA et al. 1986).

É sabido que quanto maior a densidade amostral possivelmente, melhores são os resultados. Nesse ponto os sensores são bem vindos na tentativa de se aumentar o número de amostragens em uma mesma área e se possível em menor tempo também (CARBONERA, 2007).

Parte dos problemas de interpretação ocorre porque alguns dos penetrômetros não são versáteis e apresentam problemas de padronização ao oferecem dados primários e indiretos, como o penetrômetro de impacto, ou geram gráficos mecanicamente, como o penetrógrafo. Também deve-se considerar que nos penetrógrafos manuais a penetração é controlada pela força humana, permitindo que a velocidade de penetração varie, o que pode influenciar os valores obtidos. Quando a ponteira encontra uma camada mais compactada a tendência é que a velocidade de deslocamento diminua e o operador exerce uma maior força para continuar a penetração da haste e quando o obstáculo é vencido a velocidade aumenta (CARBONERA, 2007). A norma da EP542 da ASAE (1999) cita que a velocidade de penetração da haste deve ser constante (0,03048 m/s) ao longo do deslocamento para evitar interpretações equivocadas.

Lütticken (2002) afirma em seu trabalho que a automação da amostragem de solo diminui os erros decorrentes da operação tornando-a mais confiável tanto na análise dos dados obtidos e sua variação espacial, como na amostragem exata do local previamente proposto. Afirma ainda que este método otimiza a operação diminuindo o tempo gasto com a amostragem e controla com maior eficácia a profundidade da amostra.

A coleta de dados por penetrômetros eletrônicos georreferenciados que alguns fabricantes nacionais comercializam, facilitam a coleta de dados e agilizam o processo, como também minimizam os riscos de erros de anotações e erros posteriores de processamento. A automação da coleta de dados de resistência do solo à penetração é a opção mais adequada para o levantamento da compactação de solos, no âmbito da agricultura de precisão (BIANCHINI et al., 2002).

Os mapas de índice de cone, têm se mostrado como ferramenta de grandioso valor para a visualização das configurações da resistência dos solos a penetração, especialmente ao preparo e ao tráfego efetuado pelas máquinas

agrícolas. Os valores gerados de resistência a penetração podem ser utilizados como parâmetro para classificação dos solos quanto aos quesitos de habilidade de crescimento das plantas, resistência do desenvolvimento das raízes e emergência das sementes. (MOLIN; SILVA JÚNIOR, 2003).

A utilização destes mapas do índice de cone, ou mapas de isocompactação, com interpretação associada com teor de água e tipo dos solos, pode ser extremamente útil na tomada de decisão de práticas de mobilização dos solos através do uso de equipamentos escarificadores e subsoladores (LANÇAS; SANTOS FILHO, 1998).

Estes mapas podem gerar substancial economia na condução das culturas, sendo que, é possível fazer recomendações proporcionais as variáveis encontradas, ou seja, as práticas mecanizadas são realizadas somente quando for de real necessidade (DALLABRIDA, 2008).

O uso de aparelhos automáticos que registram os valores a cada centímetro de profundidade também possibilita uma visualização adequada da camada de maior resistência. Além disso, a velocidade de penetração constante proporciona maior confiabilidade da amostragem (BIANCHINI et al., 2002).

Em estudos realizados por SIANSI et al. (2011), o sistema penetrometro eletrônico PNT-Titan foi utilizado para mapeamento da compactação do solo para fins de subsolagem em profundidade variada. A subsolagem foi realizada com base em um mapa informando qual região deveria ser mobilizada a 50 cm e qual poderia ser mobilizada apenas a 30 cm de profundidade. Utilizando-se subsolador convencional de sete hastes, a capacidade operacional foi 10% maior quando se trabalhou com altura variável do subsolador em comparação ao revolvimento da mesma área com altura fixa de 50 cm de profundidade.

Essa vantagem poderia ser ainda maior se o mapa apresentar maior área com recomendação para 30 cm. Segundo os autores, no talhão estudado, apenas 16% da área foi subsolada a 30 cm, sendo o restante trabalhado na profundidade máxima de 50 cm.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Os dados apresentados são referentes a quatro anos de avaliação em talhões comerciais de cana-de-açúcar.

Foram coletados dados de resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) e teor de água do solo. Além disso, foram considerados dados de produtividade em toneladas de colmo por hectare (TCH) dos talhões, fornecido pelo condomínio agrícola Santa Izabel a fim de confrontar com os parâmetros do solo.

Os detalhes das áreas amostrais e metodologia de cada avaliação realizada são apresentados nos próximos itens.

#### **3.1 Tratamentos**

Com o objetivo de avaliar a influência do tráfego na RMSP, foram selecionadas três talhões de colheita mecanizada em diferentes ciclos de cana soca (número de corte), sendo estes de terceiro, quinto e sexto corte após a colheita da safra 2008/09, nomeados como C3, C5 e C6 respectivamente.

A definição de tratamentos de acordo com o número de corte considera a premissa de que o tráfego repetido após cada ciclo de colheita mecanizada reflita no acúmulo de pressões sobre o solo, e que esse possa ter alterado sua estrutura física progressivamente.

A fim de assegurar que possíveis variações no solo entre os talhões tenha interferido nas comparações entre os tratamentos, as amostragens de RMSP foram repetidas nos mesmos talhões após sucessivos cortes mecanizados. Ao todo foram quatro anos consecutivos de monitoramento, sendo que no último ano (safra 2012/13) apenas a área correspondente ao tratamento C3 foi reavaliada, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos tratamentos

<i>Tratamento</i>	<b>Corte</b>			
	2009	2010	2011	2012
<b>C3</b>	3º	4º	5º	6º
<b>C5</b>	5º	6º	7º	(8º)
<b>C6</b>	6º	7º	8º	(9º)

C<sub>i</sub> = i-ésimo corte da cana-de-açúcar em (i = 3 a 6). Valores de corte entre parênteses ( ) na coluna de 2012 representam tratamentos não amostrados nesse ano.

### 3.2 Regiões amostrais e camadas avaliadas

Os valores de RMSP foram mensurados até 50 cm de profundidade, sendo posteriormente separados em cinco camadas de 10 cm para análise de médias a fim de detectar diferenças nos níveis de RMSP no perfil do solo (Figura 1).

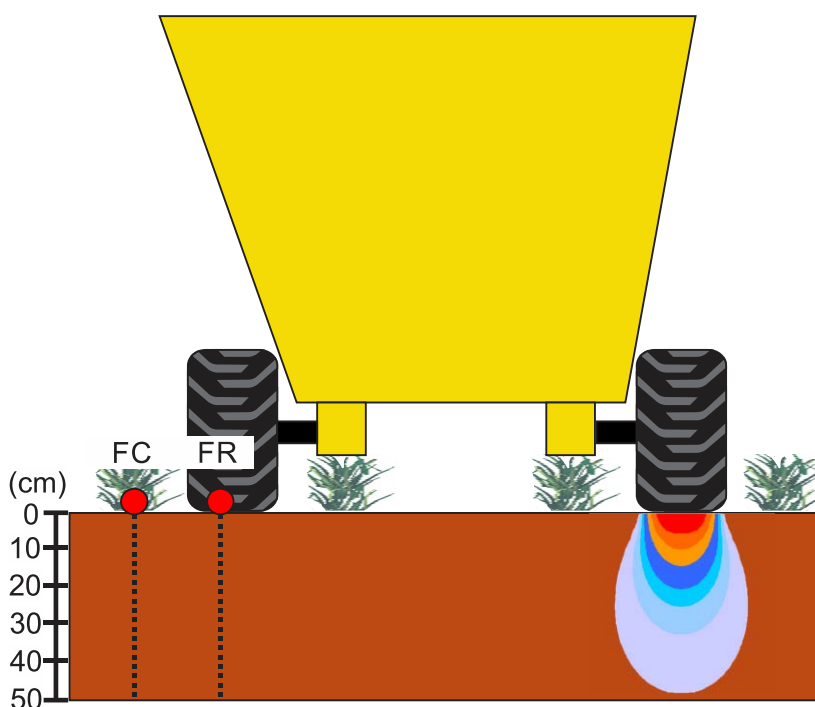


Figura 1. Esquema representativo das regiões e profundidade de amostragem da RMSP. Faixa dos rodados (FR) e da fileira de cana (FC).

Em cada tratamento foram separadas duas regiões amostrais, correspondente à faixa de passagem dos rodados (FR), e a fileira de cana (FC).

Conforme representado na Figura 2, a região FR corresponde ao centro da entre fileira de cana, região onde as bitolas dos equipamentos foram dimensionadas para posicionar os pneus, conforme descrito na Tabela 3. A região FC corresponde à região central das soqueiras, região planejada para não haver passagem dos rodados.

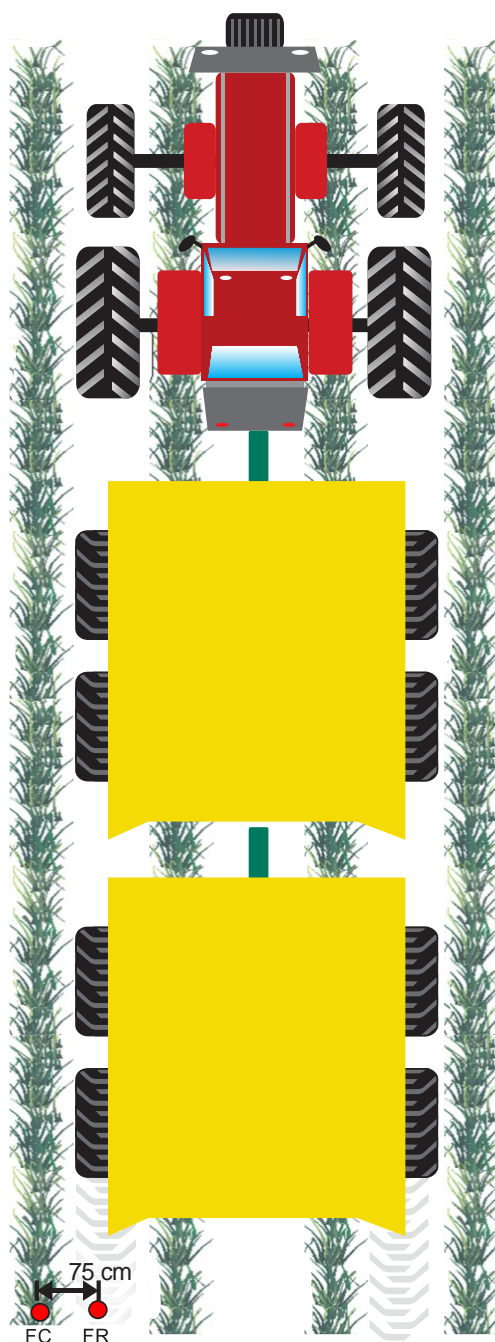


Figura 2. Esquema representativo das regiões de amostragem em relação à faixa de passagem dos rodados (FR) e da fileira de cana (FC).

### 3.3 Área Experimental

A aquisição dos dados apresentados neste trabalho iniciou no ano de 2009 em três talhões de produção mecanizada de cana-de-açúcar variedade SP 87-365, sendo finalizado em 2012 em apenas um dos talhões. As áreas amostradas pertencem à Fazendas Santa Izabel, situada na região de Jaboticabal, São Paulo, coordenadas 21°18' S e 48°10' W, altitude média 600 m. A colheita destes talhões é programada entre os meses de agosto e setembro. Na Tabela 2 estão descritas as áreas avaliadas e os respectivos cortes (ciclo) que se encontravam em cada ano de avaliação.

O solo das áreas é classificado como LATOSSOLO Vermelho eutroférico típico, textura muito argilosa e relevo suave (EMBRAPA, 1999). O clima da região é tropical com chuvas de verão (Aw) pela classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média do mês mais frio superior a 18 °C, estação invernal ausente e verão chuvoso.

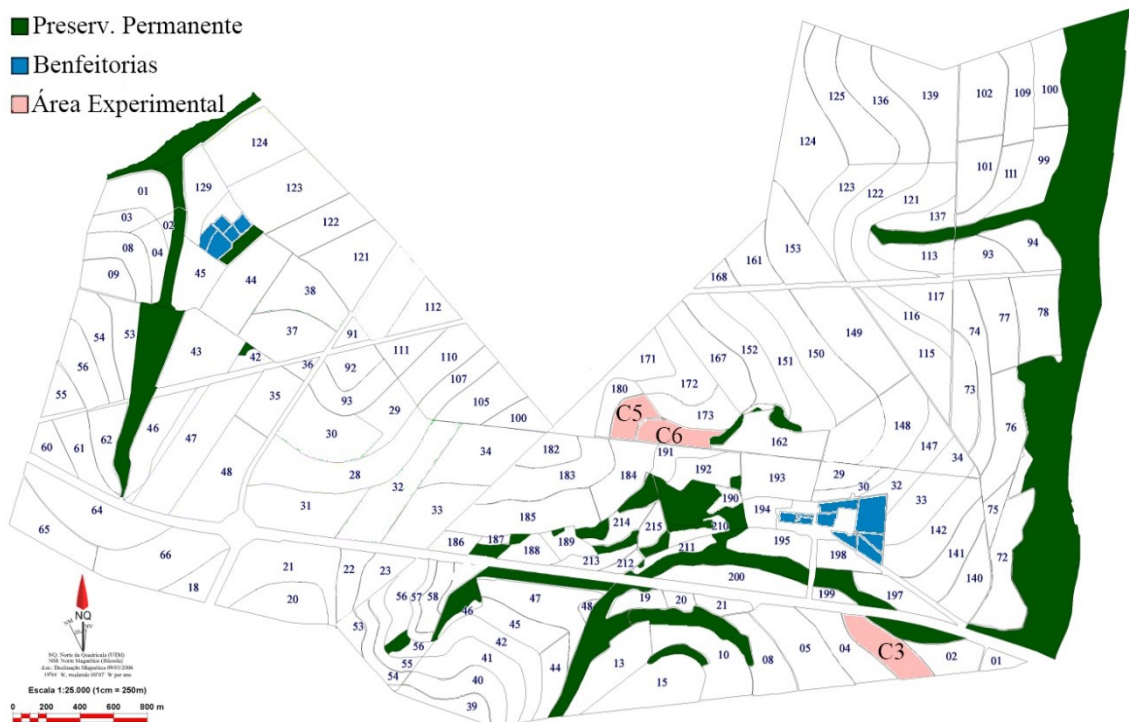
Tabela 2. Caracterização dos talhões.

Tratamento	Área (ha)	Variedade	Talhão
C3	8,87	SP 87-365	03
C5	5,06	SP 87-365	179
C6	6,13	SP 87-365	174

C<sub>i</sub> = i-ésimo corte da cana-de-açúcar em 2009 (i = 3 a 6).

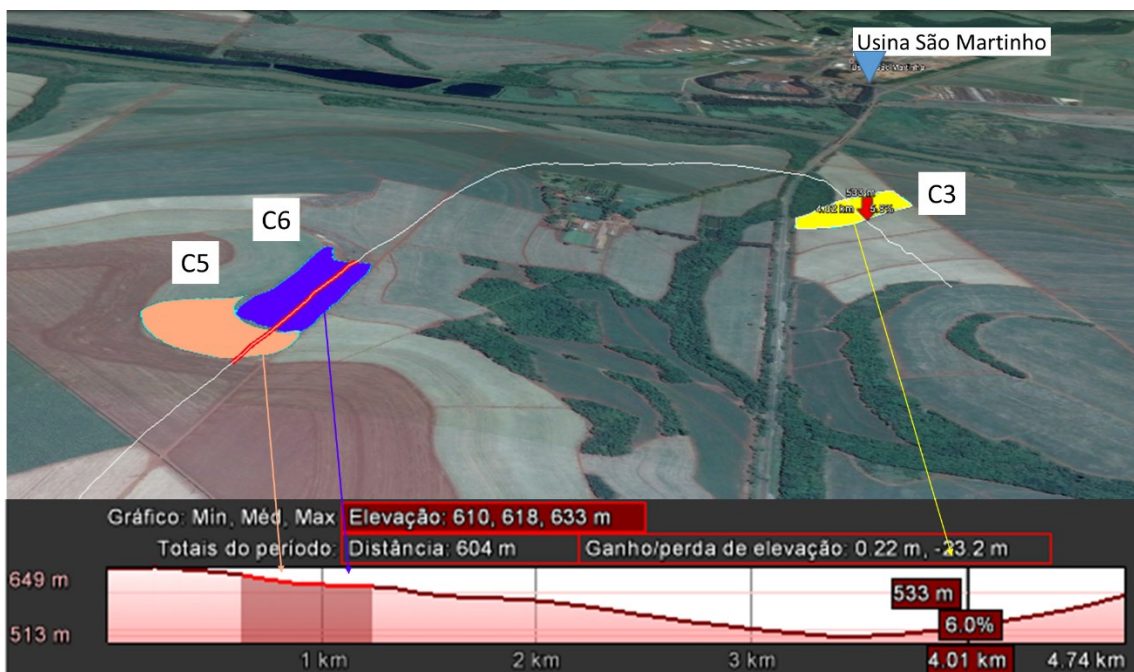
Na Figura 3 é mostrado o mapa que abrange a Fazenda Santa Izabel, na qual é possível visualizar a distribuição e localização geográfica dos talhões em estudo.

A posição topográfica dos talhões considerando o relevo da região, pode ser observada na Figura 4, sendo a linha branca a referência traçada no software Google Earth para demonstração do perfil de elevação, representado na base da imagem na região hachurada em vermelho, no eixo x correspondendo à distância horizontal e o eixo y correspondente à elevação.



Fonte: Adaptado de Grupo Santa Izabel (2008)

Figura 3. Mapa da Fazenda Santa Izabel e Fazenda Bela Vista – Talhões utilizados na pesquisa.



Fonte: Google Earth

Figura 4. Posição topográfica dos talhões considerando o relevo em larga escala e perfil de elevação.



Conforme se observa na Figura 4, os talhões estão localizados na região correspondente à encosta. O plantio da cana encontra-se em linhas curvas seguindo o declive, possuindo um ou mais terraços por talhão para contenção de água.

Na Figura 5 encontra-se o registro pluviométrico disponível da estação meteorológica de Pradópolis-SP, localizada no raio de 5 km das áreas estudadas. Os dados expressos em mm de água são correspondentes ao acumulado em cada período de dias de acordo com a dimensão do gráfico para todos os meses do ano.

### **3.4 Operações mecanizadas**

Segundo informações do Grupo Santa Izabel, nas operações de preparo do solo foram utilizados os seguintes implementos: subsolador de 5 hastes regulado para as profundidades de 45 a 50 cm; grade de 18 discos de 32 polegadas; grade de 28 discos de 28 polegadas. O sulco de plantio ficou em média com 29 cm de profundidade.

O tráfego sobre a área nos anos seguintes ao plantio e que se repetem a cada corte, consiste das operações mecanizadas de: (a) colheita mecanizada com colhedora Case IH A7700 e dois conjuntos de tratores Case IH MXM150, tracionando transbordos Case Tracan VTX10000; (b) cultivo, realizado após a colheita com trator marca Massey Ferguson 630 trabalhando com cultivador de discos, e ainda, uma operação de aplicação de vinhaça e herbicida. Na Tabela 3 encontram-se as informações relacionadas à descrição das máquinas utilizadas no sistema de colheita e cultivo.

A bitola dos equipamentos utilizados nas operações mecanizadas, conforme descrito na Tabela 3, é regulada de modo que a posição dos pneus e esteiras coincida com o espaçamento da cultura, preservando a soqueira e evitando a compactação na região da fileira de cana (FC).

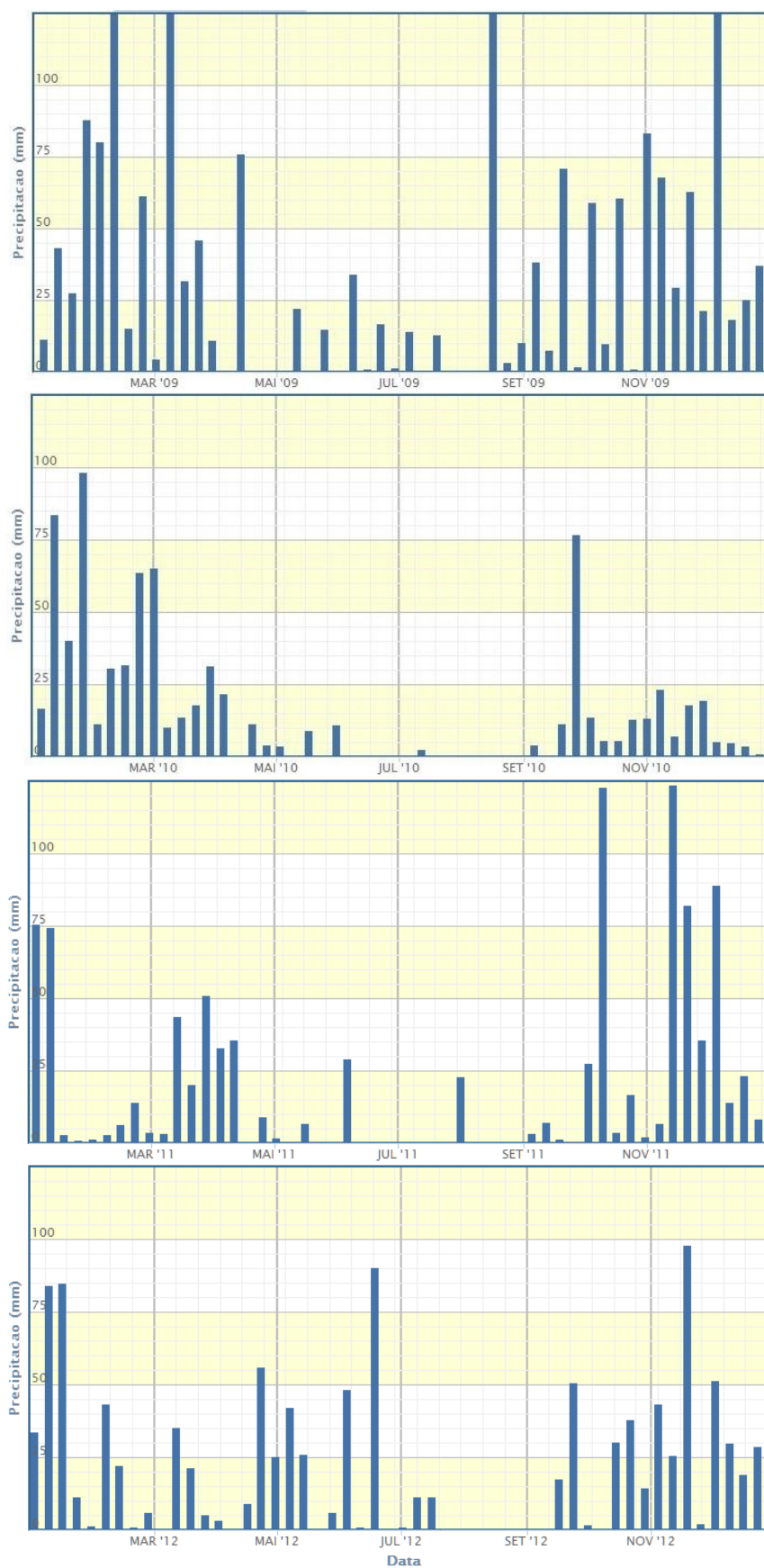


Figura 5. Precipitação registrada nos anos de 2009 a 2012. (Fonte: INMET)

Como é colhida apenas 1 fileira de cana a cada passada da colhedora acompanhada pelo trator-transbordo, cada lado da máquina (rodados do lado esquerdo e rodados do lado direito) acaba passando novamente sobre a mesma faixa de tráfego.

Portanto cada faixa de tráfego recebe a carga correspondente a metade da carga da máquina em cada passada, sendo duas passadas de cada um dos equipamentos pesados (colhedora, trator e transbordo) a cada ciclo, considerando-se que os equipamentos utilizados na colheita são os mais pesados e portanto que mais apresentam risco de compactação.

Tabela 3. Descrição das máquinas utilizadas no sistema de colheita e cultivo.

Máquina	Colhedora	Trator (colheita)	Transbordo	Trator (cultivo)
Marca	Case IH	Case IH	Tracan	Massey Ferguson
Modelo	A 7700	MXM 150	VTX 10.000	MF630
Potência	246 kW (335 cv)	110 kW (149 cv)	- -	85 kW (115 cv)
Massa	15000 kg	8000 kg	6500 kg	6700 kg
Carga	- -	- -	24 m <sup>3</sup> / 10 ton	- -
Rodado	Esteira metálica	Pneus diagonais	Pneus BPAF <sup>1</sup>	Pneus diagonais
Dianteiro		18.4-26R1		14.9-26R1
Traseiro	--	24.5-32R1	600/50-22.5	23.1-30R1
Bitola	1880 mm	2800 mm	3000 mm	1730 mm

<sup>1</sup>BPAF – baixa pressão e alta flutuação; - - inexistente. Fonte: fabricantes. Obs: A citação de marcas e modelos não indica recomendação ou endosso por parte do autor.

O equipamento transbordo é constituído de 2 unidades acompanham a colhedora ao mesmo tempo, sendo ambos tracionados por apenas um trator (Figura 2). Apesar da massa mínima de cada unidade ser 6500 kg (tara), a carga de toletes carregados é considerada cíclica, pois varia de 0 à 10.0000 kg para cada unidade conforme o enchimento da caixa pela colhedora. Portanto na média do enchimento a caixa fica com 5.000 kg de toletes de cana-de-açúcar.

Como a primeira caixa passa 50% do tempo completamente carregada até que a segunda caixa seja preenchida, considera-se a carga média da primeira unidade como 7.500 kg, que resulta em peso bruto total médio de 14.000 kg. Para a segunda unidade a carga média considerada é de apenas

5.000 kg, pois ao completar a carga o conjunto segue para o transbordamento. Portanto o peso bruto total médio considerado para a segunda caixa é de 11.500 kg.

Na Tabela 4 é computado a quantidade de passadas e peso acumulado sobre o solo dos tratamentos C3, C5 e C6 para todos os cortes avaliados (terceiro ao oitavo corte).

Tabela 4. Tráfego acumulado e carga total equivalente para cada faixa de tráfego (FR) de acordo com o ciclo (número de corte).

<b>Ciclo</b>	<b>Tráfego acumulado (nº de passadas)</b>					<b>Carga total (t)</b>
	<i>Colhedora</i>	<i>Trator</i>	<i>Transbordo 1</i>	<i>Transbordo 2</i>	<i>Total</i>	
<b>3</b>	6	6	6	6	24	146
<b>4</b>	8	8	8	8	32	194
<b>5</b>	10	10	10	10	40	243
<b>6</b>	12	12	12	12	48	291
<b>7</b>	14	14	14	14	56	340
<b>8</b>	16	16	16	16	64	388

### 3.5 Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP)

#### 3.5.1 Penetrômetro

O penetrômetro modelo PNT-2000/MOTOR (Figura 6) de comando totalmente eletrônico possui entrada para GPS e é constituído de célula de carga com capacidade nominal de 150 kgf (1500 N) para medição da força normal de penetração da haste.

A haste utilizada possui ponteira cônica de 71,25 mm<sup>2</sup> (para solos muito argilosos) e construída segundo o padrão ASAE S313.3 (ASAE, 1998) que determina as normas para o ensaio. A profundidade máxima de amostragem é de 55 cm, medida por sensor indutivo-capacitivo com 2 mm de precisão. A velocidade de penetração da haste foi de 3 cm s<sup>-1</sup> e a frequência de aquisição de 3 Hz, portanto, os dados foram coletados em intervalos de 1 cm.



Fonte: DLG Automação Industrial Ltda (2008)

Figura 6. Penetrômetro eletrônico modelo PNT-2000/MOTOR.

A comunicação com o Penetrômetro segue o padrão NMEA-0183. A conexão com o GPS e a transferência dos dados coletados e armazenados no equipamento é feita utilizando-se uma interface serial RS-232. Os dados são descarregados diretamente ao software de computador fornecido pela fabricante do penetrômetro, denominado PNTView.

O quadriciclo utilizado para acoplar o penetrógrafo é da marca Suzuki Motors, modelo LT-F160 QUADRUNNER, que possui massa seca de 162 kg, motor monocilindro com volume total de 158 cm<sup>3</sup>, quatro tempos arrefecido a ar, OHC e movido à gasolina (Figura 7).

### 3.5.2 Amostragem da RMSP

Para as medições da RMSP foi utilizado o sistema Penetrômetro Eletrônico PNT-2000/MOTOR (Figura 6), contando com duas unidades, uma montada em carrinho com duas rodas para deslocamento manual, e outra acoplada a um quadriciclo, sendo este denominado como PNT-Titan (Figura 7) o qual foi desenvolvido pela empresa DLG Automação Industrial Ltda. em parceria com o Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) da UNESP/Jaboticabal em projeto financiado pelo CNPq.



Legenda: 1 - Sistema de configuração, operação e aquisição de dados do penetrômetro.  
 2 - Motor elétrico de acionamento da haste do penetrômetro;  
 3 - Sensor indutivo-capacitivo de medição da profundidade de penetração da haste;  
 4 - Alavanca de posicionamento do penetrômetro para operação ou transporte;  
 5 - Célula de carga para medição da força normal à penetração da haste até 1500N;  
 6 - Haste do penetrômetro.

Fonte: Toledo et al. (2009)

Figura 7. Vista geral do PNT-Titan e detalhamento do penetrômetro.

As amostragens foram realizadas cerca de 30 dias após a colheita, nas datas: 27/08/2009 (C5 e C6-2009); 14/01/2010 (C3-2009); 24/10/2010 (C5 e C6-2010); 28/10/2010 (C3-2010); 28/10/2011; 25/10/2012, já com a cana perfilhada e após a operação de cultivo. A data foi definida de acordo com as precipitações descritas na Figura 5, a fim de garantir teor mínimo de água no solo para os ensaios de penetrometria, e manter homogeneidade entre as avaliações.

O delineamento amostral foi distribuído em pontos georreferenciados em grid regular abrangendo toda área do talhão comercial, O espaçamento adotado entre os pontos do grid e a densidade amostral de cada talhão foi pré-definido de acordo com as dimensões de cada talhão e alterada em algumas reavaliações nos anos seguintes.

A marcha de amostragem foi praticamente a mesma em todos os anos, com algumas alterações que serão destacadas em cada item, considerando o restante igual ao apresentado para o primeiro ano.

O sistema de aquisição de dados do PNT-Titan estava conectado ao receptor de sinal GPS marca Garmin, modelo Etrex Vista com precisão de 7 m que permitia coletar as informações de latitude e longitude de cada ponto

amostrado, armazenando-as juntamente com os respectivos valores de força e profundidade.

Em cada talhão foram realizados diferentes números de amostras, em função do tamanho da área e do grid amostral adotado.

O posicionamento das amostragens seguiu o sentido da fileira de plantio, iniciando-se em cada linha a uma distância da bordadura equivalente à 50% do espaçamento do grid definido. O término, quando não coincidiu com essa distância, foi ajustado para ficar em um valor proporcional à bordadura e o ponto anterior.

Conforme mostrado na Figura 8, a coleta seguiu a mesma fileira de cana e faixa de rodado do começo ao final de cada linha, e ao término de cada linha, deslocou-se o equipamento transversalmente ao sentido dos sulcos de plantio, percorrendo a mesma distância do espaçamento adotado entre os pontos na linha, porém no sentido perpendicular, até atingir a próxima linha para iniciar o processo novamente. Esse procedimento foi repetido ao término de cada linha, até chegar ao final do talhão, com pelo menos 5 linhas de sobra até o limite.



Figura 8. Sequência de amostragem realizada no tratamento C6 na avaliação após o corte de 2011.

Os detalhes da metodologia adotada em cada ano estão descritas nos subitens 3.5.2.1 ao 3.5.2.4., abordando as especificidades ocorridas em cada amostragem da RMSP.

### **3.5.2.1. Amostragem após o corte de 2009**

A navegação entre os vértices e entre as linhas para mudança de fileira ao atingir a bordadura, foi feita pelo medidor de distância do receptor GPS, em saltos de 40 m e 35 m, para o tratamento C3 e tratamentos C5 e C6 respectivamente, seguindo o esquema semelhante ao apresentado na Figura 8.

O maior espaçamento para o tratamento C3 foi devido à este estar localizado em talhão de área 58% superior à média dos demais.

Em cada vértice do grid amostral foram amostrados quatro pontos, sendo dois na faixa do rodado (FR), e dois na fileira de cana (FC). Portanto foram feitas duas repetições para cada região FR e FC, possibilitando assim a obtenção da média do ponto a fim de minimizar possíveis erros de medição.

Na Tabela 5 (página 28) encontra-se representada a quantidade de pontos amostrais obtidos em cada tratamento.

### **3.5.2.2. Amostragem após o corte de 2010**

Nas amostragens realizadas no segundo ano de avaliação, os procedimentos de campo para coleta das amostras foram praticamente os mesmos, com apenas algumas mudanças na metodologia com base em apontamentos obtidos de outros estudos, com o objetivo de melhorar a qualidade do trabalho, principalmente no sentido de avaliar a variabilidade espacial dos pontos georreferenciados.

A principal alteração em relação ao ano anterior foi na eliminação da repetição por vértice do grid, possibilitando reduzir o espaçamento do grid amostral e aumentar a densidade de vértices por hectare, conforme demonstrado na Tabela 6 (página 28).

Quanto à distância entre o primeiro e último ponto de cada linha em relação à bordadura, também foi alterado de forma a coincidir esses pontos com a primeira soqueira com perfilhos presentes na fileira selecionada.



### **3.5.2.3. Amostragem após o corte de 2011**

No terceiro ano de avaliação os procedimentos foram iguais ao ano anterior, sendo reduzido o espaçamento do grid amostral apenas no tratamento C5.

A quantidade total de pontos obtida em cada talhão (Tabela 7, página 28), é resultado do grid adotado e da alocação dos pontos nas bordaduras e casamento das linhas finais.

Portanto como pode-se observar em comparação à quantidade de amostras no ano de 2010 (Tabela 6), a mesma área e o mesmo grid amostral podem resultar em quantidade diferente de amostras, e portanto variando a densidade amostral que é resultado da área total do talhão dividido pela quantidade de vértices obtidos no talhão.

### **3.5.2.4. Amostragem após o corte de 2012**

No quarto e último ano de avaliação apenas o tratamento C3 foi reavaliado, já que outras áreas apresentaram problemas de praga nessa safra e tiveram sua colheita antecipada.

Em relação à metodologia, a alocação dos pontos foi feita de forma diferente à fim de proporcionar maior precisão na distribuição e permitir o georreferenciamento dos pontos com receptor GPS geodésico RTK.

Para isso foi feito prévio caminhamento na área para estaqueamento dos vértices amostrais, medindo a distância entre os pontos com auxílio de trena.

A distância definida entre os pontos foi 25 m, e após posicionada a estaca o ponto foi medido com o GPS. Dessa forma não se fez necessário o GPS de navegação para a coleta das amostras com o penetrômetro, identificando os locais amostrais pelas estacas e extraíndo as coordenadas de cada ponto pelas informações exportadas do sistema GPS geodésico.

Na Tabela 8 (página 28) é apresentado a quantidade de amostras realizadas com o penetrômetro.

Tabela 5. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2009.

Tratamento	Área do Talhão (ha)	Quantidade de amostras				Grid Amostral (m)	Densidade amostral (v/ha)
		FR		FC			
		R1	R2	R1	R2		
C3	8,87	46	46	46	46	40x40	5,2
C5	5,06	47	47	47	47	35x35	7,7
C6	6,13	40	40	40	40	35x35	7,9
TOTAL		872					

EF e FIL = Entrefileira e Fileira de plantio respectivamente. R1 e R2 = Repetição 1 e 2 respectivamente. Ci = i-ésimo corte da cana-de-açúcar (i = 2 a 6).há/ha = vértices do grid por hectare.

Tabela 6. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2010\*.

Tratamento	Área do Talhão (ha)	Quantidade de amostras		Grid Amostral (m)	Densidade amostral (v/ha)
		FR	FC		
C3	8,87	118	118	30x30	13,3
C5	5,06	59	59	30x30	11,7
C6	6,13	77	77	30x30	12,6
TOTAL		508			

Tabela 7. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2011\*.

Tratamento	Área do Talhão (ha)	Quantidade de amostras		Grid Amostral (m)	Densidade amostral (v/ha)
		FR	FC		
C3	8,87	107	107	30x30	12,1
C5	5,06	80	80	25x25	15,8
C6	6,13	66	66	30x30	10,8
TOTAL		506			

Tabela 8. Pontos coletados nas áreas amostrais no ano de 2012\*.

Tratamento	Área do Talhão (ha)	Quantidade de amostras		Grid Amostral (m)	Densidade amostral (v/ha)
		FR	FC		
C3	8,87	144	144	25x25	16,2
TOTAL		288			

EF e FIL = Entrefileira e Fileira de plantio respectivamente. Ci = i-ésimo corte da cana-de-açúcar (i = 2 a 6). v/ha = vértices do grid por hectare. (\*Válido para Tabelas Tabela 6 Tabela 7 Tabela 8)

### 3.6 Teor de água ou umidade gravimétrica do solo

Tendo em vista que a compactação do solo está diretamente relacionada ao teor de água e ao tipo de solo, foram coletadas amostras nas camadas de 1-10, 11-20, 21-30, 31-40, 41-50 cm em cinco pontos de cada talhão concomitante à aquisição de dados de RMSP, com o auxílio de trado manual e armazenadas em cápsulas de alumínio. Assim que chegaram do campo, as amostras foram pesadas (massa úmida) em balança eletrônica e foram colocadas em estufa a 105° C por 24 horas.

Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas (massa seca), permitindo assim a determinação do teor de água segundo o método gravimétrico padrão (EMBRAPA, 1979), representado pela fórmula abaixo:

$$\text{Umidade Gravimétrica (\%)} = 100 (a - b) / b \quad (1)$$

em que,

a – massa da amostra úmida (g)

b – massa da amostra seca (g)

### 3.7 Análise Estatística

Os resultados de RMSP obtidos para cada região amostral (FR e FC) em cada subcamada (1-10, 11-20, 21-30, 31-40, 41-50) foram submetidos à análise estatística descritiva para o cálculo das medidas de tendência central (média e mediana) e coeficiente de variação e desvio padrão.

As médias obtidas para dados de RMSP e teor de água foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade quando houve significância na análise de variância (teste F de Snedecor a 5% de probabilidade) para as variáveis RMSP e teor de água no solo, em função dos diferentes tratamentos C3, C5, C6

em todos anos avaliados, entre as camadas de 1-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm de profundidade, e entre as regiões amostrais de RMSP (FR e FC).

Os valores de RMSP foram representadas por meio dos diagramas de caixas (*box plot*) para visualizar a variabilidade e a simetria do conjunto de dados.

O diagrama de caixa ou boxplot permite a representação de parâmetros descritivos, como a mediana (Q2), quartil inferior (Q1), quartil superior (Q3), intervalo interquartil ( $IQR = Q3 - Q1$ ), e os valores máximos e mínimos. As médias identificadas pelos círculos no interior dos retângulos cinzas estão rotuladas imediatamente acima de cada retângulo (valores já apresentados na tabela 1), seguidas pelas letras que indicam o resultado do teste de médias para detecção de diferença entre as camadas avaliadas. Os retângulos cinzas representam o IQR de cada camada. As caudas verticais inferior e superior abrangem o intervalo entre o valor mínimo e máximo respectivamente.

Quando um valor amostrado dentro do grupo de dados de cada camada atingiu um valor superior ao valor correspondente a  $Q3 + (1,5 \times IQR)$ , esses pontos foram representados por (\*), definidos como outliers.

A determinação da estatística descritiva e o teste de Tukey, bem como os diagramas de caixa, foram executados por meio do software Minitab 16.

### **3.8 Distribuição espacial da RMSP**

A análise da distribuição espacial foi realizada apenas no tratamento C3 no qual foram coletados dados georreferenciados por quatro anos.

O objetivo foi a criação de mapas de isolinhas de valores de RMSP no intervalo de 1 MPa, sendo cada mapa correspondente à área total do talhão, permitindo assim verificar a variação da RMSP ao longo da área.

Os dados armazenados na memória do penetrometro eletrônico foram exportados para o software computacional denominado PNT-View, desenvolvido pela fabricante do penetrômetro (DLG Automação Industrial Ltda), e que é responsável pela aquisição e tratamento dos dados obtidos no campo.

Os dados foram separados por região amostral (FR e FC) e por camada, sendo calculada a média de cada 10 registros (10 cm de profundidade) de cada ponto (vértice do grid). Dessa forma, para cada corte do tratamento C3 foram criados dois mapas (FR e FC) estratificados em cinco camadas cada (1-10, 11-20, 21-30, 31-40 e 41-50 cm), abrangendo a área de todo o talhão.

Os dados tratados foram interpolados utilizando o programa Surfer 10 (GOLDEN SOFTWARE, 2011) pelo método do inverso do quadrado da distância para criação dos mapas de variabilidade espacial do IC.

Para a criação dos mapas o software baseia-se nas coordenadas gravadas de cada ponto amostrado, fazendo a interpolação dos dados de RMSP pelo método do inverso do quadrado da distância para estimar os valores das áreas não amostradas. A interpolação é calculada por um algoritmo que utiliza a média ponderada do valor de RMSP pela distância dos vizinhos de cada ponto.

Por meio dos mapas interpolados é possível fazer comparações visuais dos níveis de compactação de cada tratamento e de cada profundidade do perfil do solo amostrado, bem como relacionar se as manchas coincidem entre os anos de avaliação do mesmo talhão, cujos pontos foram alocados em vértices seguindo grid regular porem aleatório aos dos anos anteriores.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Histórico de produtividade das áreas experimentais

A Tabela 10 contém os dados de produtividade fornecidos pelo Grupo Santa Izabel referente às safras desde o primeiro corte de cada área em estudo, conforme se pode observar na Tabela 9 correspondente. Os dados de produtividade são estimados por metodologia adotada pelo grupo com base na aferição dos caminhões carregados utilizados no transporte da cana colhida.

São exibidos os resultados até safra 13/14, colhida no final do ano de 2013, que fecha o ciclo das avaliações do solo finalizadas no ano de 2012 no tratamento C3 (após colheita da safra 2012/2013).

Tabela 9. Número de corte (ciclo) das áreas amostrais nas últimas dez safras até 2014.

<i>Tratamento</i>	<b>Número de corte</b>									
	<i>Safra</i>									
	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	11/12	12/13	13/14
<b>C3</b>				1	2	3	4	5	6	7
<b>C5</b>		1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>C6</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fonte: Condomínio Agrícola Santa Izabel.

Tabela 10. Histórico de produtividade dos cortes no período de 2004 a 2014.

<i>Tratamento</i>	<b>Produtividade (TCH)</b>									
	<i>Safra</i>									
	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	11/12	12/13	13/14
<b>C3</b>				138	128	112	71	72	102	106
<b>C5</b>		122	121	84	76	91	85	68	99	99
<b>C6</b>	110	91	76	75	76	108	85	68	99	99

Fonte: Condomínio Agrícola Santa Izabel.

Observa-se que de modo geral ocorreu diminuição na produtividade de um ano para o outro até a safra 2007/08, correspondendo com a tendência natural dos canaviais. Porém, observou-se aumento na produtividade de 08/09

para 09/10, com exceção do tratamento C3, já que a queda observada do 1º para o 2º e até o 3º corte é normalmente maior, dificilmente sendo superada a produtividade do primeiro corte nos cortes seguintes, mesmo por razões climáticas.

Este aumento pode estar relacionado a diversos fatores, como por exemplo, a temperatura e a precipitação, o que é justificado segundo CONAB (2011), relatando que o excesso de precipitações ocorrido na maior parte do ciclo da cultura (Figura 5), principalmente na Região Centro-Sul, ajudou no desenvolvimento vegetativo da safra 2009/2010.

Porém esse patamar de produtividade não se manteve na safra 10/11, caindo ainda mais na safra de 11/12, ano em que foi colhida a menor média nos tratamentos C5 e C6, e a segunda menor do C3.

#### 4.2 Teor de água do solo

Pela a comparação dos valores médios no perfil (Tabela 11) entre os tratamentos, apenas o tratamento C3 apresentou diferenças entre si, sendo que foi o tratamento de menor teor de água, com valor até 24,8 pontos percentuais abaixo do C5 no ano de 2011.

Tabela 11. Teste de média do teor de água do solo para profundidade 0 - 50 cm nos tratamentos C3, C5 e C6 nos quatro\* anos de avaliação.

<i>Tratamento</i>	<b>Teor de água do solo (%)</b>			
	<i>Ano de amostragem</i>			
	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>
<b>C3</b>	24,8 Bb	7,2 Cc	27,3 ABb	29,3 A
<b>C5</b>	31,2 Aa	29,9 Ab	32,0 Aa	
<b>C6</b>	31,5 Aa	31,9 Aa	29,4 Aab	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. \*C5 e C6 não foram amostrados em 2012.

Ao se comparar os teores de água do solo nas diferentes profundidades para cada tratamento (Tabela 12), observa-se que não foi constatada diferença entre as camadas avaliadas.

Tabela 12. Teste de média para valores de teor de água no perfil do solo avaliado nos tratamentos C3, C5 e C6 para os quatro\* anos de avaliação.

Profundidade	Teor de água do solo (%)			
	Ano de amostragem			
	2009	2010	2011	2012
	C3			
0-10	25 Ba	9 Ca	26 ABa	29 Aa
10-20	25 Aa	8 Ba	26 A a	28 Aa
20-30	25 Ba	6 Ca	27 ABa	29 Aa
30-40	25 Ba	6 Ca	28 ABa	30 Aa
40-50	25 Ba	7 Ca	29 ABa	31 Aa
	C5			
0-10	30 ABa	29 Ba	32 Aa	
10-20	31 A a	29 Aa	32 Aa	
20-30	30 A a	30 Aa	32 Aa	
30-40	31 A a	30 Aa	32 Aa	
40-50	32 A a	31 Aa	33 Aa	
	C6			
0-10	31 Aa	32 Aa	28 Aa	
10-20	32 Aa	32 Aa	29 Aa	
20-30	30 Aa	31 Aa	30 Aa	
30-40	32 Aa	32 Aa	28 Aa	
40-50	33 Aa	33 Aa	32 Aa	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si para cada tratamento, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. \*C5 e C6 não foram amostrados em 2012.

Desta forma, assume-se que as médias de teor de água entre as camadas avaliadas apresentaram valores semelhantes dentro de cada tratamento, e que os dados obtidos pela penetrômetria indicaram a camada compactada no solo efetivamente.

Em relação aos diferentes tratamentos, pode ter ocorrido influência do teor de água nos valores de RMSP, principalmente ao se comparar os dados com o tratamento C3, no qual os valores de RMSP podem ter sido superestimados devido ao menor teor de água no momento das medições com o penetrômetro, justificado pelo aumento das forças de coesão entre as partículas do solo (CUNHA et al., 2002).

A alteração do teor de água do solo é um ponto crítico na avaliação da RMSP em áreas distantes ou em anos diferentes devido à forte dependência que estes parâmetros apresentam, como já relatado por diversos autores (GOMES & PEÑA, 1996).



É importante procurar estabelecer as avaliações sempre após um período semelhante de chuvas homogêneas, realizando o experimento no mesmo dia em todas áreas a serem comparadas a fim de evitar que a evapotranspiração e infiltração interfira no conteúdo de água do solo na camada avaliada, ou ainda que novas precipitações venham ocorrer entre as avaliações.

Apesar de conhecer esse critério, nem sempre é possível seguir o mesmo padrão em ensaios de penetrometria, as vezes por disponibilidade de equipe, equipamentos ou até mesmo da área experimental. Além disso seria necessário uma ferramenta adicional, por exemplo sonda TDR, para aferir o teor de água do solo em tempo real no momento antes de decidir iniciar as amostragens.

Por esses fatores observa-se que os valores de teor de água do tratamento C3 foram muito inferiores no ano de 2010 em comparação aos demais anos do mesmo talhão e inclusive dos demais tratamentos no mesmo ano, uma vez que este não pode ser aferido no mesmo dia que os demais.

### **4.3 Resistência Mecânica do Solo à Penetração**

#### **4.3.1 Comparação entre cortes**

Na Figura 9 e Figura 10 estão os diagramas de caixa (*boxplot*) que representam as médias de cada tratamento em cada ano de amostragem na região da faixa dos rodados (FR) e fileira de cana (FC) respectivamente, a fim de comparar as médias entre cada número de corte (ciclo).

Os tratamentos estão distribuídos no eixo horizontal do gráfico de acordo com o número de ciclo que se encontravam em cada ano de avaliação, sendo o número classificado em ordem crescente da esquerda para a direita.

Como os valores de RMSP estão relacionados com o teor de água do solo no momento da avaliação, os dados de teor de água foram plotados no mesmo gráfico com escala independente, sendo os valores exibidos em cada ponto para servir como referência para a análise das médias de RMSP.

Não se observa tendência dos valores médios em relação ao ciclo de corte tanto para FR quanto para FC, portanto o resultado não seguiu a hipótese de que a resistência mecânica do solo à penetração aumente proporcionalmente ao número de corte.

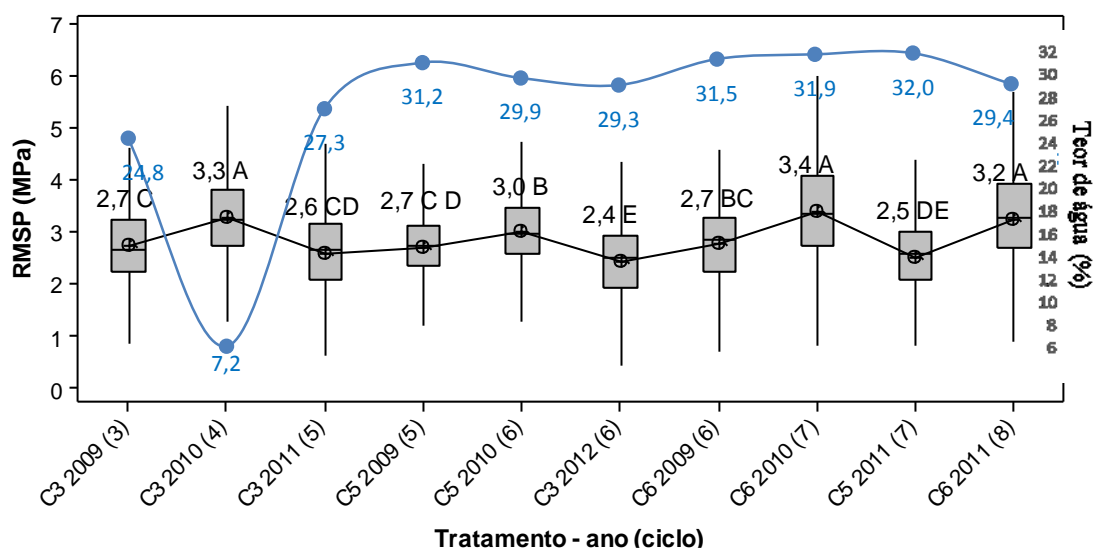
Apesar de não ter sido desenvolvido um fator de correção para estimar quanto o teor de água interferiu nos valores de RMSP medidos nesse solo, em alguns pontos ficou evidente forte influência nos resultados.

Um exemplo claro é o tratamento C3 no ano 2010 (ciclo 4), onde o teor de água foi muito inferior aos demais tratamentos, e conseqüentemente o nível de RMSP nesse ponto (ciclo 4) foi superestimado (BUSSCHER et al., 1997), uma vez que o teor de água no solo tem relação inversamente proporcional à RMSP (FREDDI et al., 2006; HOLLAND, 2007; LIMA et al., 2006) devido ao aumento da força de coesão entre as partículas conforme se reduz o teor de água do solo. (CUNHA et al., 2002; ELBANNA; WITNEY 1987).

Dessa forma a média do ponto C3 2010 (4) foi superior aos demais pontos de ciclo 5 e 6, apenas sendo igualado pelos níveis apresentados pelo ciclo 8 e um dos tratamentos em ciclo 7 (C6 2010), segundo o teste estatístico.

Sendo assim, pode-se compensar alguns valores que não seguiram a hipótese do trabalho pela explicação da relação com o teor de água, mas ainda não se teria uma linha ascendente de RMSP da esquerda para a direita, ou seja, aumentando conforme o ciclo, já que maior parte dos valores de teor de água não diferiram entre si pelo teste de médias (Tabela 11), não servindo como explicação para as médias com nível discrepante em relação ao ciclo de corte.

Tal distribuição dos resultados pode ser explicado por variáveis não controladas, como o teor de água do solo no momento da colheita de cada talhão em cada ano, sendo que a susceptibilidade à compactação do solo aumenta quanto maior for o teor de água durante as operações agrícolas. Outro fator poderia ser alguma diferença não detectada na composição do solo de cada área, que apesar de próximos podem apresentar pequenas variações.

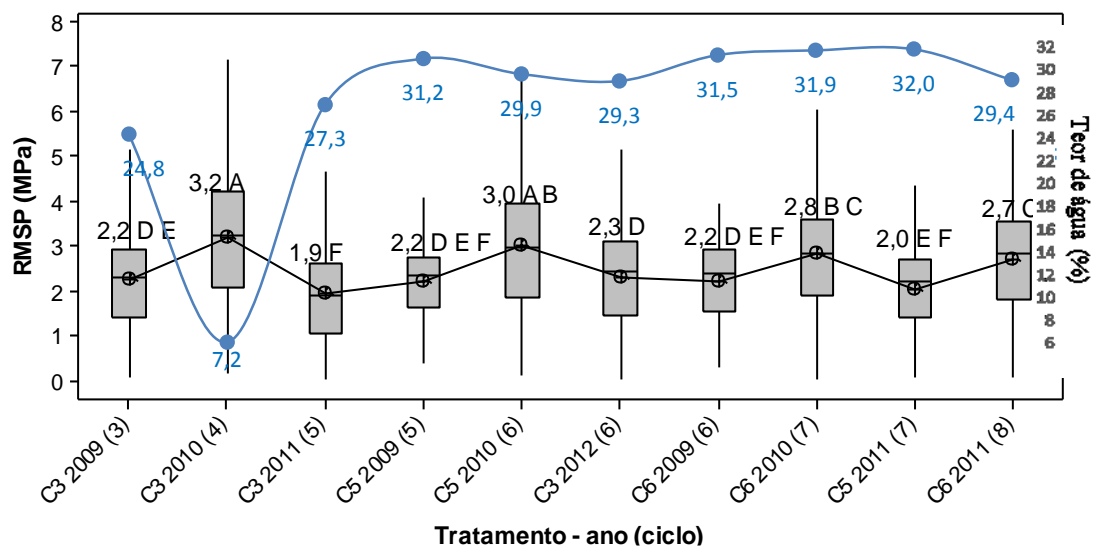


<sup>1</sup> Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup> (i) = i-ésimo ciclo de cultivo de cana soca (i = 3 a 8), descrito na legenda do eixo horizontal.

<sup>3</sup> pontos unidos por linha de referência = valores médios de teor de água do solo em cada amostragem de RMSP, conforme valores expressos na Tabela 11.

Figura 9. Diagrama de caixa e teste de médias para valores de RMSP juntamente com respectivas médias do teor de água do solo, para camada 1-50 cm de cada tratamento em cada ano de avaliação na região faixa do rodado (FR).



<sup>1</sup> Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>2</sup> (i) = i-ésimo ciclo de cultivo de cana soca (i = 3 a 8), descrito na legenda do eixo horizontal.

<sup>3</sup> pontos unidos por linha de referência = valores médios de teor de água do solo em cada amostragem de RMSP, conforme valores expressos na Tabela 11.

Figura 10. Diagrama de caixa e teste de médias para valores de RMSP juntamente com respectivas médias do teor de água do solo, para camada 1-50 cm de cada tratamento em cada ano de avaliação na região fileira de cana (FC).

Além disso, considera-se ainda a estabilização da estrutura do solo apresentada entre o 3º e o 8º corte é significativo, sendo que muitos autores consideram que a maior alteração na estrutura do solo ocorre no primeiro contato com os rodados ou implementos de máquinas, que aconteceu no primeiro corte portanto.

A condição de RMSP variou praticamente da mesma maneira para ambas regiões, sendo que a linha de tendência seguiu a mesma direção na região FR (Figura 9) e FC (Figura 10) entre cada ciclo, apesar de com amplitudes diferentes.

Como o tráfego das máquinas é concentrado na região FR, esperava-se que o aumento ou diminuição nos valores de RMSP na região FR fosse de certa maneira independente das variações na região FC.

Tal fato evidencia que as alterações físicas na estrutura do solo ao longo do ciclo anual talvez não estejam atreladas apenas ao tráfego de máquinas, mas também à fenômenos que afetam a área de maneira geral (FR e FC) como ciclo de umedecimento e secamento, rearranjo natural das partículas, desenvolvimento dos microrganismos do solo e estabilização da matéria orgânica, principalmente se considerar a quantidade de palha deixada em cobertura após a colheita.

Os dados de produtividade TCH foram considerados nos gráficos da Figura 11 para comparação com as médias de RMSP na fileira de cana (FC) de cada tratamento ao longo dos cortes avaliados.

Uma vez que a RMSP é mensurada logo após a colheita, o principal fator compactante que deseja-se detectar advém do tráfego recente da colhedora e conjuntos transbordo. Portanto espera-se que o nível de RMSP aferido em um determinado ano poderá interferir principalmente no desenvolvimento da próxima soca e portanto na produtividade da safra seguinte.

A escala do eixo horizontal secundário (à direita) indica os valores de RMSP na ordem inversa para facilitar a visualização de tendência, pois é esperado que quanto maior o valor de RMSP menor será a produtividade obtida no ano seguinte devido aos efeitos prejudiciais da compactação do solo no desenvolvimento da cultura.

Os valores de umidade constam como referência em que a RMPS foi mensurada, conforme o teste de médias da Tabela 11, sendo que apenas no tratamento C3 ocorreu diferença entre os anos avaliados e principalmente os valores de 2010 foram superestimados o que deve ser interpretado no gráfico como se a linha azul puxasse a linha preta.

Dessa forma, considera-se que a inclinação da linha entre 2009 e 2010 seria menos acentuada se não fosse a influência do teor de água do solo, apesar de que mesmo assim ficaria configurado aumento da RMSP nesse intervalo, seguindo o mesmo que ocorreu para os demais tratamentos nesse ano.

Esse comportamento condiz com a produtividade, que teve queda no ano seguinte (safra 2011/2012), que porém também pode ainda ser explicada pela menor quantidade de precipitação no segundo semestre de 2010 e primeiro semestre de 2011.

Entre os anos 2010 e 2011 os valores de RMSP reduziram em todos tratamentos, seguindo o mesmo caminho que as colunas verdes no gráfico, já que a produtividade aumentou, portanto mais uma vez a RMSP foi coerente com a produtividade, não havendo porém nenhuma explicação climática brusca ou alguma interferência apontada pela administração da Fazenda Santa Izabel.

Como esse comportamento contradiz com a hipótese de que a RMSP aumente conforme o acúmulo de tráfego, uma explicação para a variação encontrada nas médias de RMSP de 2010 para 2011 é que a colheita em 2010 provavelmente tenha sido realizada com o solo mais úmido já que o índice de precipitação no período da colheita foi maior em 2010 em relação a 2011, conforme mostrado na Figura 5. Estando em níveis muito acima da condição normal do solo, a estrutura tem tendência à se arranjar de forma a retornar ao estado anterior após um período sem tráfego, conforme detectado posteriormente em 2011.

Essa explicação é possível pois apesar de o fator mais impactante na estrutura do solo cultivado com cana ser o tráfego decorrente da colheita, a colheita de um talhão ocorre em apenas um momento de todo o ciclo da cultura, sendo que durante o restante do ano o solo fica sujeito à atuação dos demais fatores, mesmo que em intensidade e impacto menor.

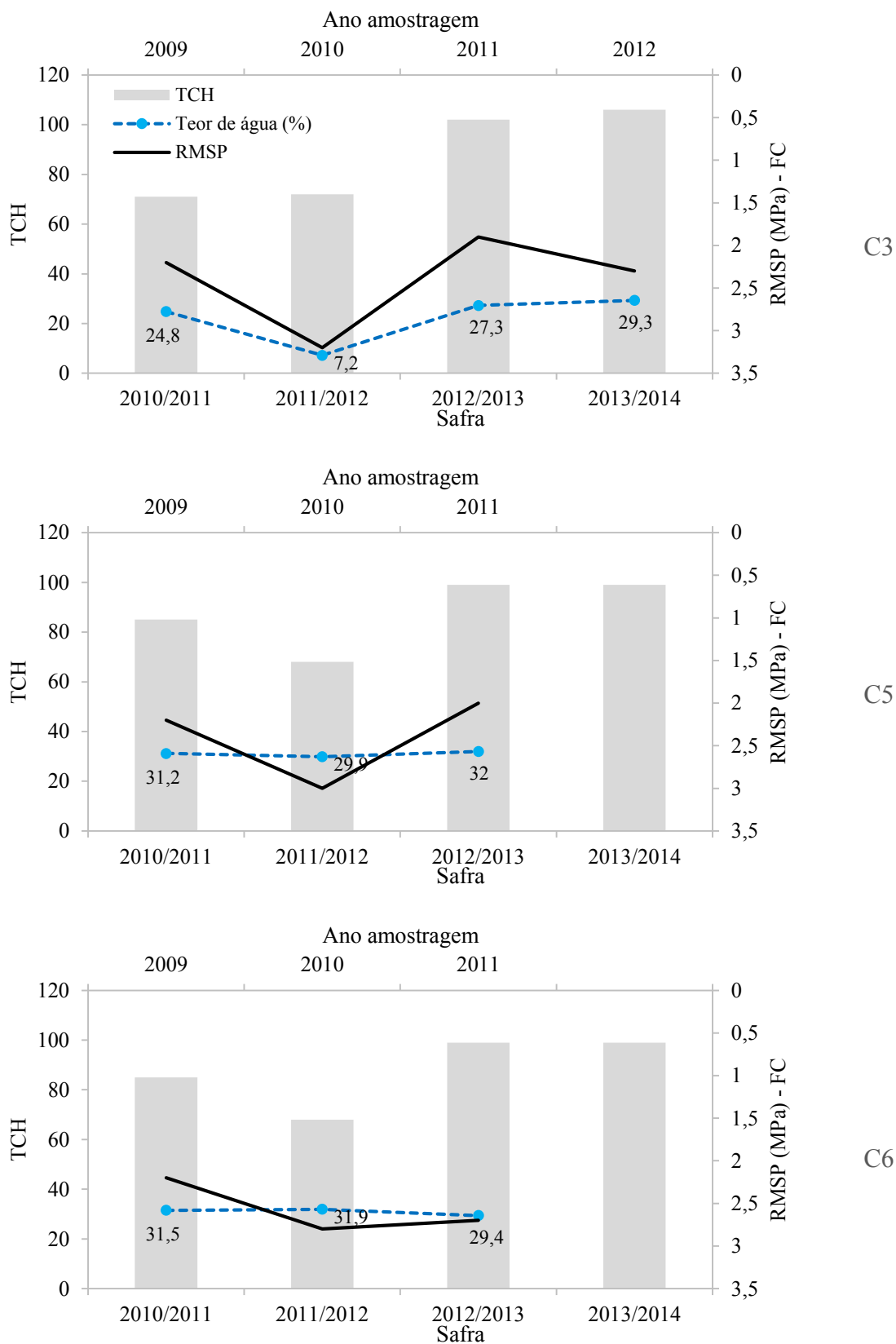


Figura 11. Valores médios de RMSP na fileira de cana (FC) e teor de água (%) em relação à produtividade obtida em cada tratamento na safra do ano seguinte ao de cada amostragem.

#### 4.3.2 Variação no perfil

A distribuição da RMSP em cada camada do solo pode indicar diferenças relacionadas ao tráfego de máquinas agrícolas.

Devido ao alto coeficiente de variação encontrado em dados de RMSP, foi realizada a análise dos resultados por meio de diagramas de caixa.

Nas Figura 12 a Figura 14, são apresentados os valores médios de cada camada de 10 cm avaliada, representados em diagramas de caixa (*boxplot*) acompanhados pelos testes de média, comparando as cinco profundidades de cada região de um mesmo tratamento e das duas regiões de cada profundidade de cada tratamento.

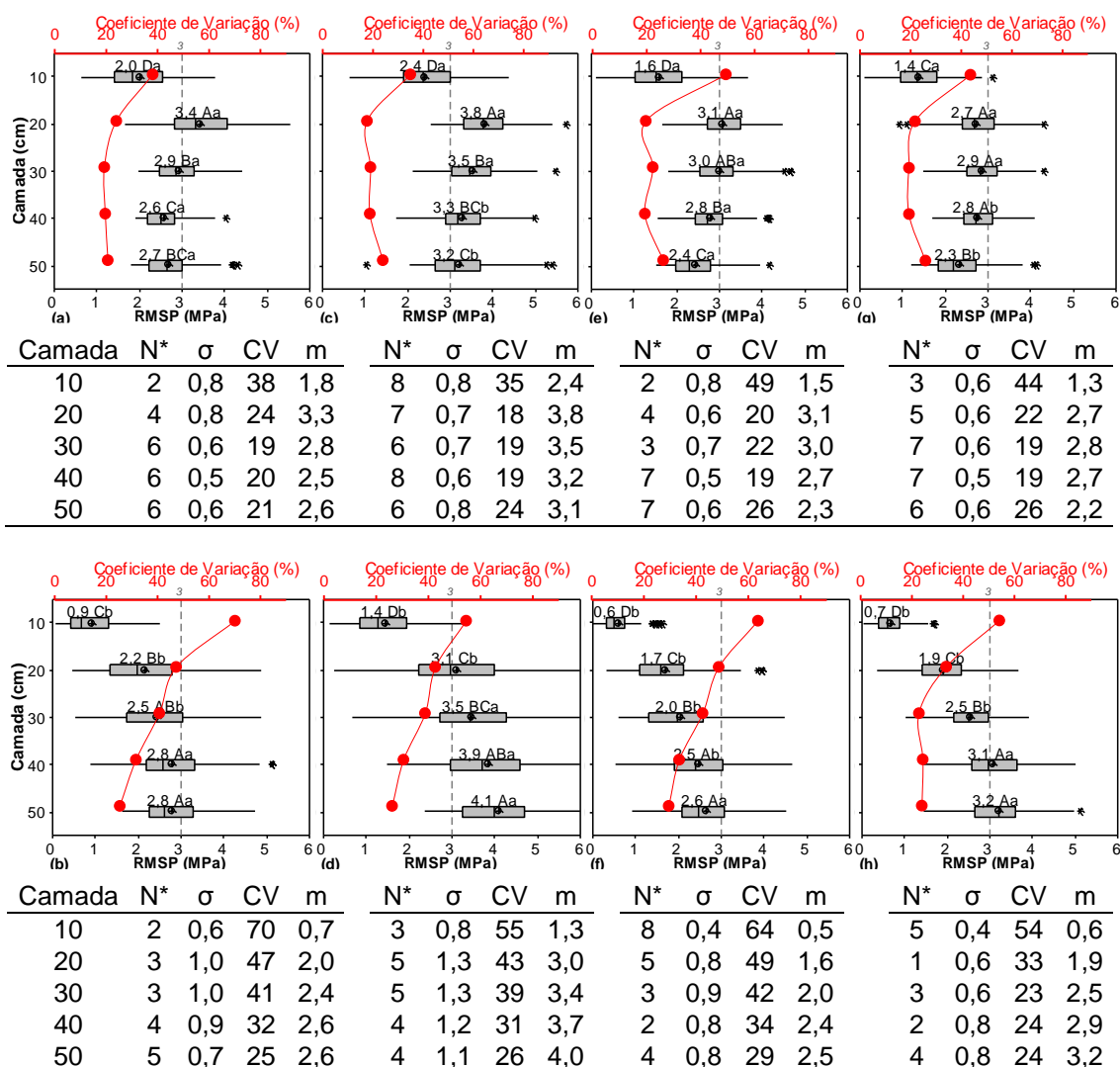
Os parâmetros de estatística descritiva - coeficiente de variação (CV%), desvio padrão e mediana também são apresentados na legenda das figuras.

Para melhor visualizar a tendência da distribuição do CV% no perfil do solo bem como o comportamento em cada região de amostragem, os valores foram plotados juntos ao diagrama de caixa, sendo estes representados em escala independente, localizada no eixo horizontal superior do gráfico.

Por meio de análise prévia alguns dados indicados como discrepantes (*outliers*) foram excluídos da análise, sendo a quantidade por cada camada indicado na legenda por (N\*).

Os pontos discrepantes geralmente foram de valores extremamente altos, portanto, a principal explicação é que esses pontos ocorreram devido a presença de torrões no solo, já que a maioria ocorreu em apenas uma camada por ponto. Tocos ou rebolos deixados no solo também podem ocasionar valores muito elevados. O valores muito baixos que se caracterizaram como *outliers* podem ser devido a buracos no solo ou galerias de insetos.

Ao se comparar as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, pode-se observar que, para todos os tratamentos, ocorreram diferenças estatísticas significativas entre as camadas avaliadas.

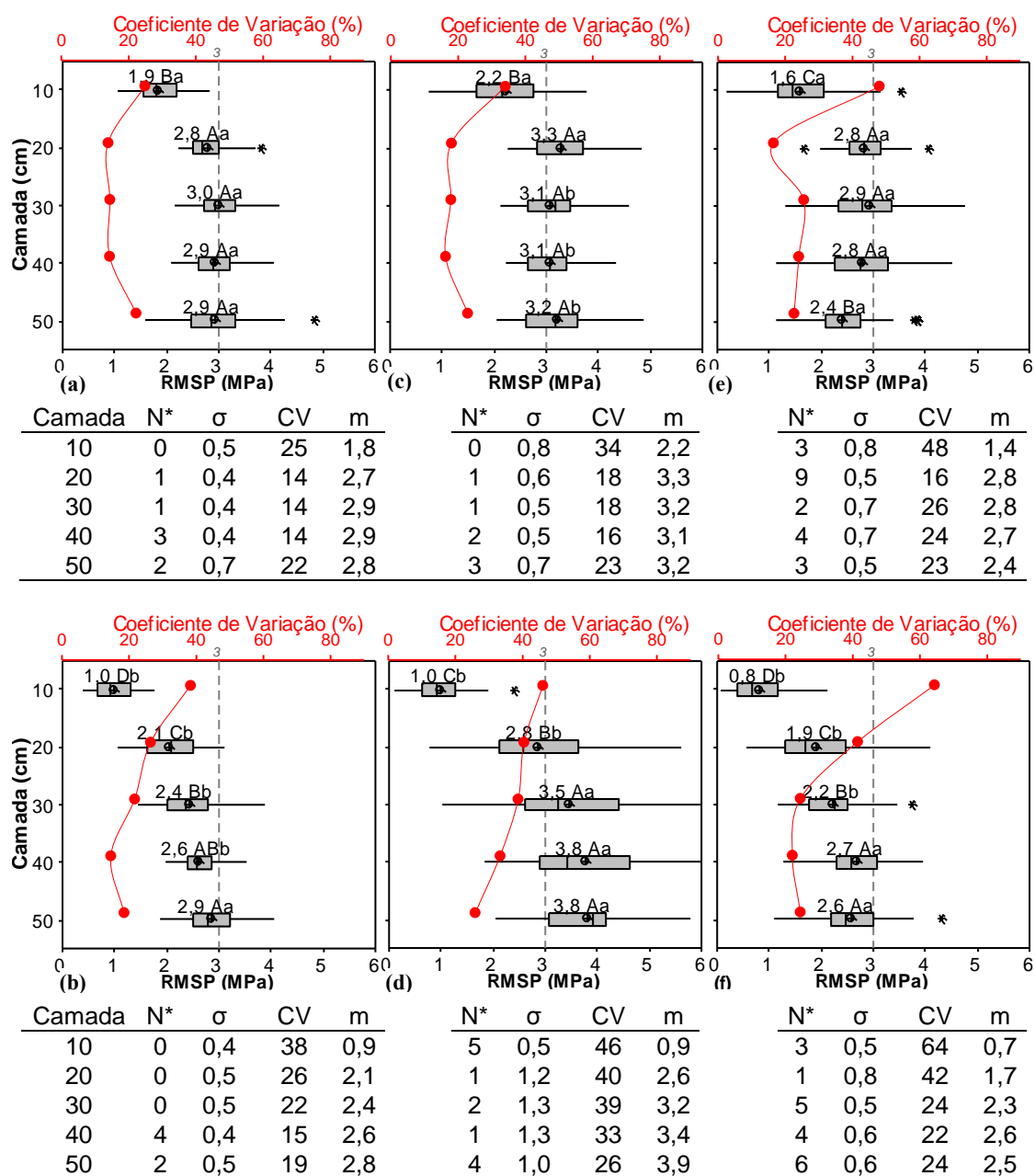


<sup>1</sup> Para cada gráfico, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as camadas do perfil. Para cada par de gráfico (a) e (b), (c) e (d), (e) e (f), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si para cada camada.

<sup>2</sup> Parâmetros: N\* - quantidade de dados discrepantes (outliers) excluídos;  $\sigma$  - desvio padrão; CV - coeficiente de variação (%); m - mediana.

Figura 12. Estatística descritiva e análise de variância dos valores de RMSF entre as camadas avaliadas de cada região amostral FR (a, c, e) e FC (b, d, f) para o tratamento C3 na safra 2008/09 (a, b), 2009/10 (c, d) e 2010/11 (e, f).

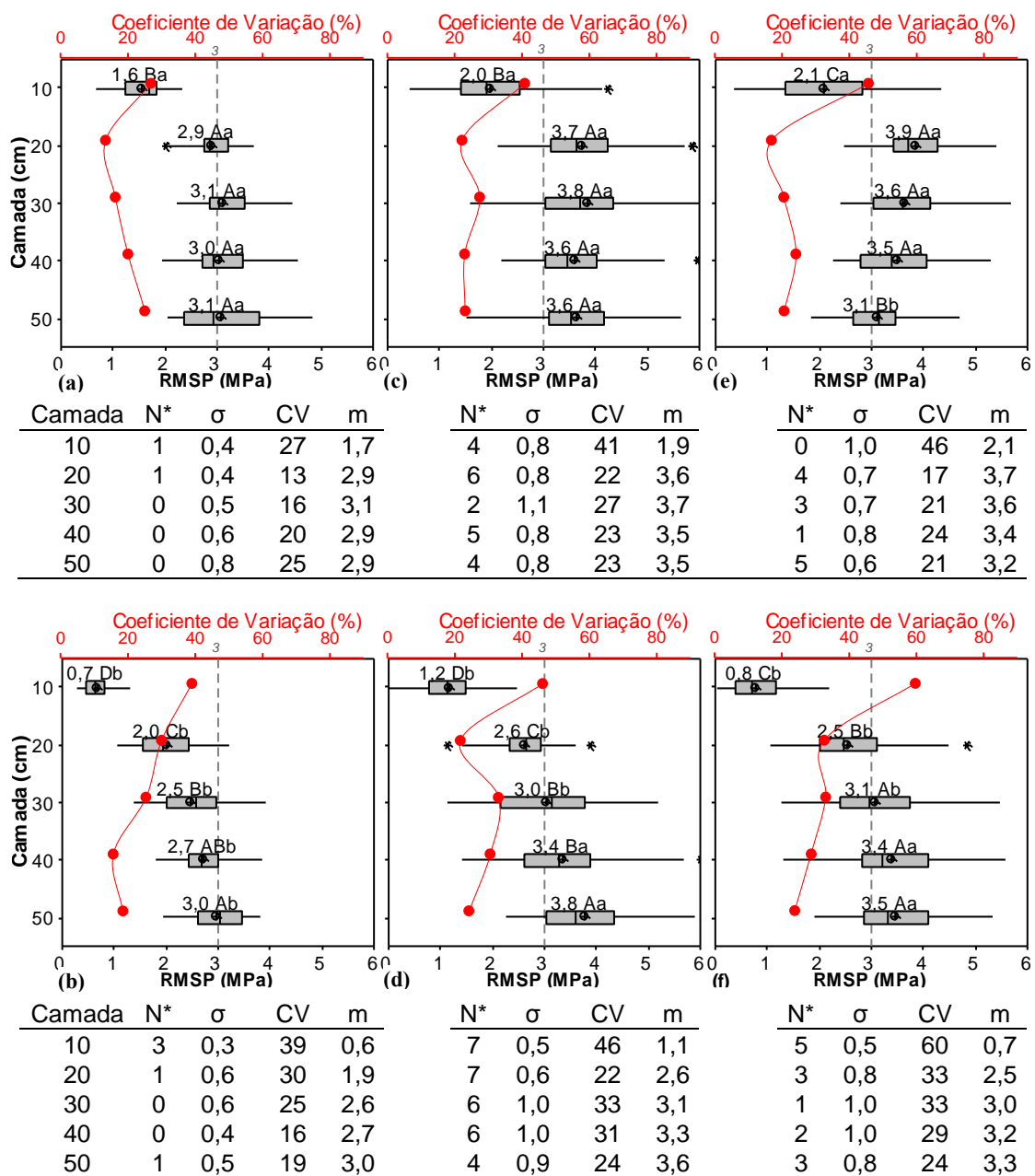




<sup>1</sup> Para cada gráfico, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as camadas do perfil. Para cada par de gráfico (a) e (b), (c) e (d), (e) e (f), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si para cada camada.

<sup>2</sup> Parâmetros: N\* - quantidade de dados discrepantes (outliers) excluídos;  $\sigma$  - desvio padrão; CV - coeficiente de variação (%); m - mediana.

Figura 13. Estatística descritiva e análise de variância dos valores de RMSP entre as camadas avaliadas de cada região amostral FR (a, c, e) e FC (b, d, f) para o tratamento C5 na safra 2008/09 (a, b), 2009/10 (c, d) e 2010/11 (e, f).



<sup>1</sup> Para cada gráfico, médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as camadas do perfil. Para cada par de gráfico (a) e (b), (c) e (d), (e) e (f), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si para cada camada.

<sup>2</sup> Parâmetros: N\* - quantidade de dados discrepantes (outliers) excluídos;  $\sigma$  - desvio padrão; CV - coeficiente de variação (%); m - mediana.

Figura 14. Estatística descritiva e análise de variância dos valores de RMSP entre as camadas avaliadas de cada região amostral FR (a, c, e) e FC (b, d, f) para o tratamento C6 na safra 2008/09 (a, b), 2009/10 (c, d) e 2010/11 (e, f).

A camada superficial foi a que apresentou menores valores em ambas regiões amostrais. Nas camadas inferiores, a distribuição no perfil foi diferente para cada região, apesar de em algumas profundidades os valores serem iguais para as regiões FR e FC do mesmo tratamento, o que geralmente ocorreu na camada de 31-40 e 41-50 cm.

Para região FC os níveis de RMSP aumentaram consecutivamente até 30 cm, sendo a camada de 21-30 maior que a de 11-20 e está maior que a de 1-10 cm em todos tratamentos. A camada de 31-40 cm apresentou tendência de redução do aumento da RMSP pela profundidade, sendo superior à camada de 21-30 cm apenas nos tratamentos C3 e C5 na avaliação de 2011. A camada de 41-50 cm apresentou em geral os maiores níveis de RMSP, ficando superior às três primeiras camadas (até 30 cm) na maioria dos tratamentos, exceto C3 2009, C5 2010 e C6 2011, confirmando assim a tendência geral de aumento conforme a profundidade, mais acentuado até 30 cm.

Para região FR as médias atingiram valores máximos na camada 11-20 em todos os tratamentos, mantendo-se iguais nas camadas inferiores para os tratamentos C5 e C6 2009 e 2010. Nos tratamentos C3 2012 e C5 e C6 2011, houve decréscimo na camada mais profunda (41-50 cm), ficando essa entre os níveis da camada superficial e das anteriores. No tratamento C3 2009 a 2011 ocorreu maior variação entre as camadas da região FR, com tendência de decréscimo conforme a profundidade a partir da camada de 11-20 cm.

Carvalho et al. (2006) avaliando a RMSP em um sistema sem revolvimento do solo e com presença de palhada na cobertura, à semelhança das condições encontradas no presente trabalho, encontrou valores de RMSP na camada superficial substancialmente menores que os restantes, sendo inclusive, menor que o valor de 2,0 MPa.

Segundo os autores, tal fato foi relacionado por Silva et al. (1994) devido, provavelmente, à maior quantidade de matéria orgânica presente na camada superficial do solo, resultante da decomposição da palhada da cultura anterior e também da ação dos mecanismos rompedores do solo utilizados para deposição do adubo e semente que a semeadora/adubadora de plantio direto possui.

Em sistemas sob cultivo mecanizado de cana-de-açúcar, o revolvimento da camada superficial está atrelado principalmente à operação de cultivo, que na área estudada foi realizado a uma profundidade de 10 a 15 cm segundo os dados fornecidos pelo Grupo Santa Izabel. (RIBEIRO, 2010).

Nota-se que a maioria dos resultados apresentou valores de coeficiente de variação (CV%), superiores a 20%, classificados conforme Pimentel-Gomes (2000) como altos e muito altos (>30 %), indicando alta variabilidade dos dados, concordando com os resultados obtidos por Souza et al. (2006), quando avaliou a RMSP em latossolos.

Tal fato destaca-se mais ainda na camada superficial de todos os cortes, onde os valores de CV% foram superiores a 25%, chegando até 70% no tratamento C3 2009 FC.

Coeficiente de variação elevado (41,08%), para a RMSP na camada superficial (1-10 cm), foi encontrado por Castro (1995) em Latossolo Roxo, para cultura anual. Fato semelhante também observado por Ribon et al. (2008) no estudo da RMSP em latossolos, no qual foi verificado CV% de 42,85% na camada superficial.

Os elevados valores de CV% encontrados nessa camada podem ser explicados pelo fato de ser a camada diretamente em contato com o rodado das máquinas que podem mobilizar o solo, como as garras dos pneus de tratores por exemplo. Além disso as operações de cultivo e manejo revolvem a camada superficial para incorporação de fertilizantes.

Através dos gráficos de CV% ficou evidente o comportamento no perfil conforme a região de amostragem. Na região FR os valores foram muito altos, na camada superficial 1-10 cm ficando em média 40%, retornando para valores menores (20%) na camada 11-50 cm, na média dos tratamentos.

Para região FC os valores foram muito altos na camada superficial (54% na média) reduzindo gradativamente até a camada mais profunda 41-50 cm, atingindo valores na média de 25%.

Varição semelhante foi encontrada por Carvalho et al. (2006) em dados de RMSP de um Latossolo Vermelho, onde observou diminuição do CV% com o aumento da profundidade do solo.

Esse comportamento pode ser explicado uma vez que os fatores que interferem na estrutura do solo na região FC são diferentes, já que nesta região ocorreu a abertura do sulco de plantio até a profundidade média de 30 cm, com deposição dos toletes de cana. Além disso é nessa região que se encontra a soqueira com presença de colmos que podem ser atingidos pelo penetrômetro, além de concentrar o maior desenvolvimento de raízes principalmente até 50 cm de profundidade, que podem interferir na estruturação do solo.

A distribuição vertical da RMSP no perfil do solo pode ser melhor visualizada nos gráficos (Figura 15 a Figura 17) que demonstram a média de todos os pontos de cada região amostral (FC e FR), com registro de valores a cada 1 cm de profundidade, diferenciando-se dos valores apresentados nos diagramas de caixa que expressam as médias por camada de 10 em 10 cm.

O uso de aparelhos automáticos que registram os valores a cada centímetro de profundidade possibilita uma visualização adequada da camada de maior resistência. Além disso, a velocidade de penetração constante proporciona maior confiabilidade da amostragem (BIANCHINI et al., 2002).

Pelas curvas fica claro que os valores de RMSP da região FR aumentaram bruscamente até 10 cm de profundidade, ocorrendo redução ou suave variação na camada entre 21-50 cm.

Nota-se que na profundidade de 50 cm é onde estão os maiores valores de RMSP para FC, porém o maior aumento ocorreu até 20 cm de profundidade.

O efeito das pressões impostas na camada superficial do solo na região de passagem do rodado (FR) pode ter ocasionado os maiores valores na camada inferior a esta, refletindo até 30 cm de profundidade.

O tipo padrão de variação vertical da RMSP observada nos gráficos pode ser explicado pelo fato de que a compactação ao longo do perfil do solo se dá de forma diferenciada, sendo influenciada por dois fatores principais. A incidência de compactação no horizonte superficial do solo é principalmente determinada pela pressão de contato entre o solo e o rodado, enquanto que em subsuperfície a carga do eixo torna-se o fator mais importante (HÅKANSSON e VOORHEES, 1998).

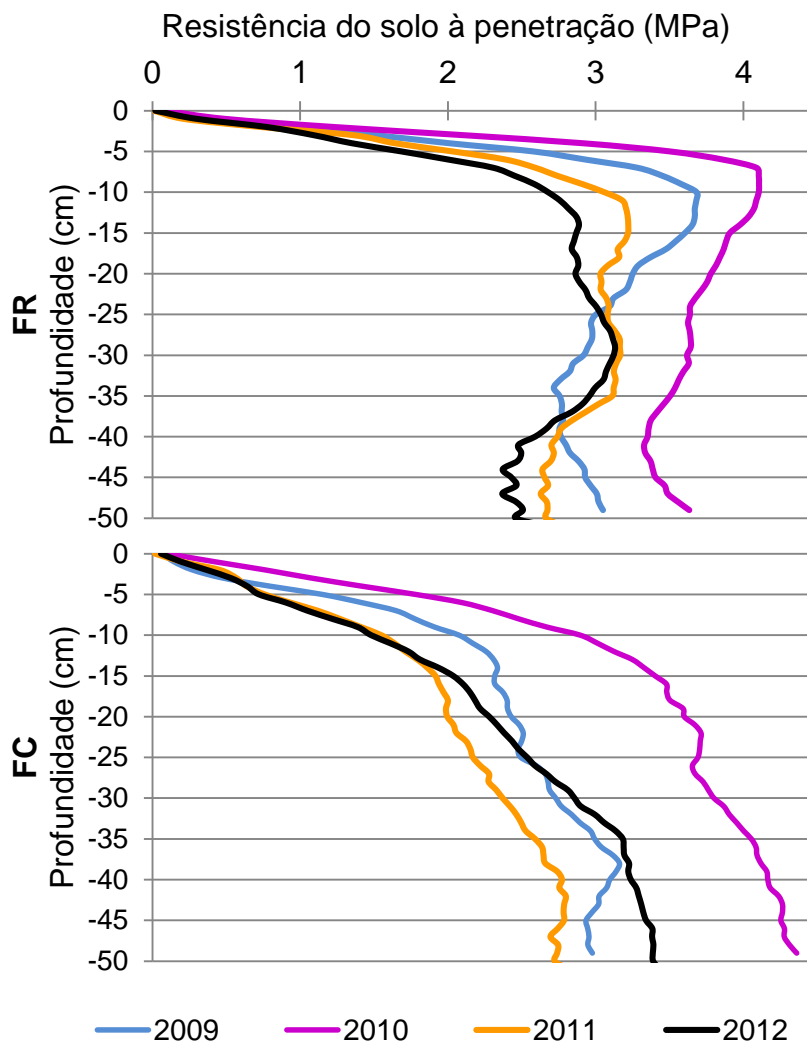


Figura 15. Valores médios da RMSP a cada 1 cm de profundidade na região FR e FC do tratamento C3 nos 4 anos de avaliação.

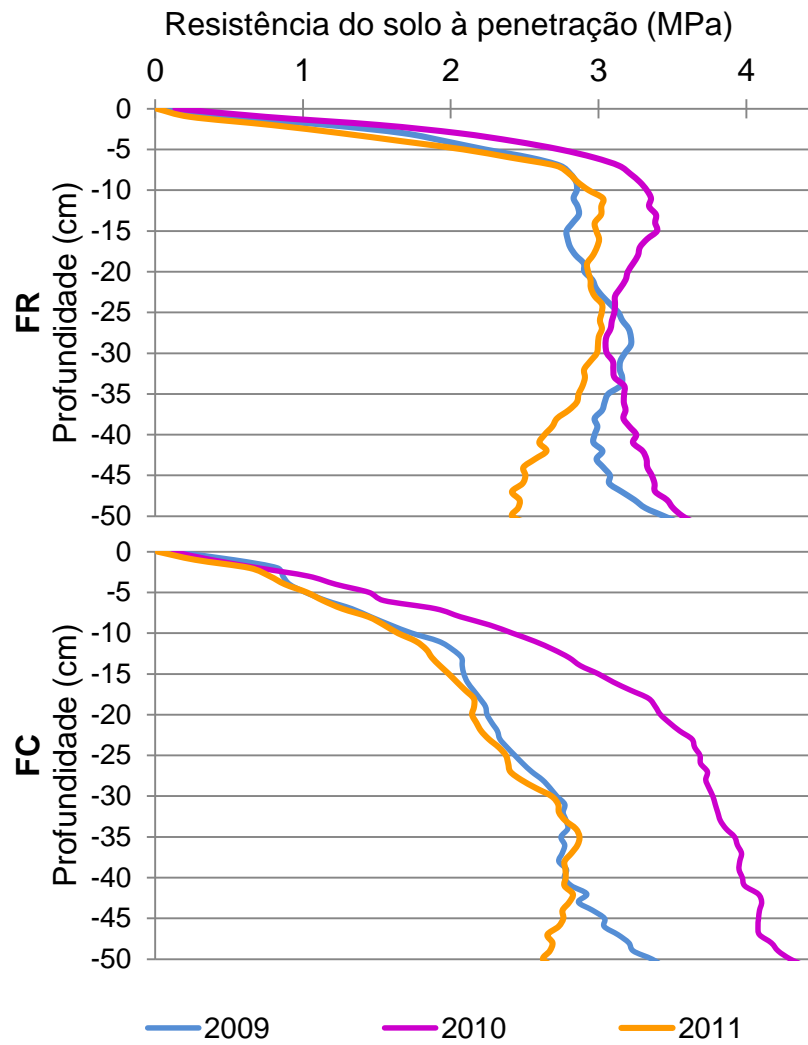


Figura 16. Valores médios da RMSP a cada 1 cm de profundidade na região FR e FC do tratamento C5 nos 3 anos de avaliação.

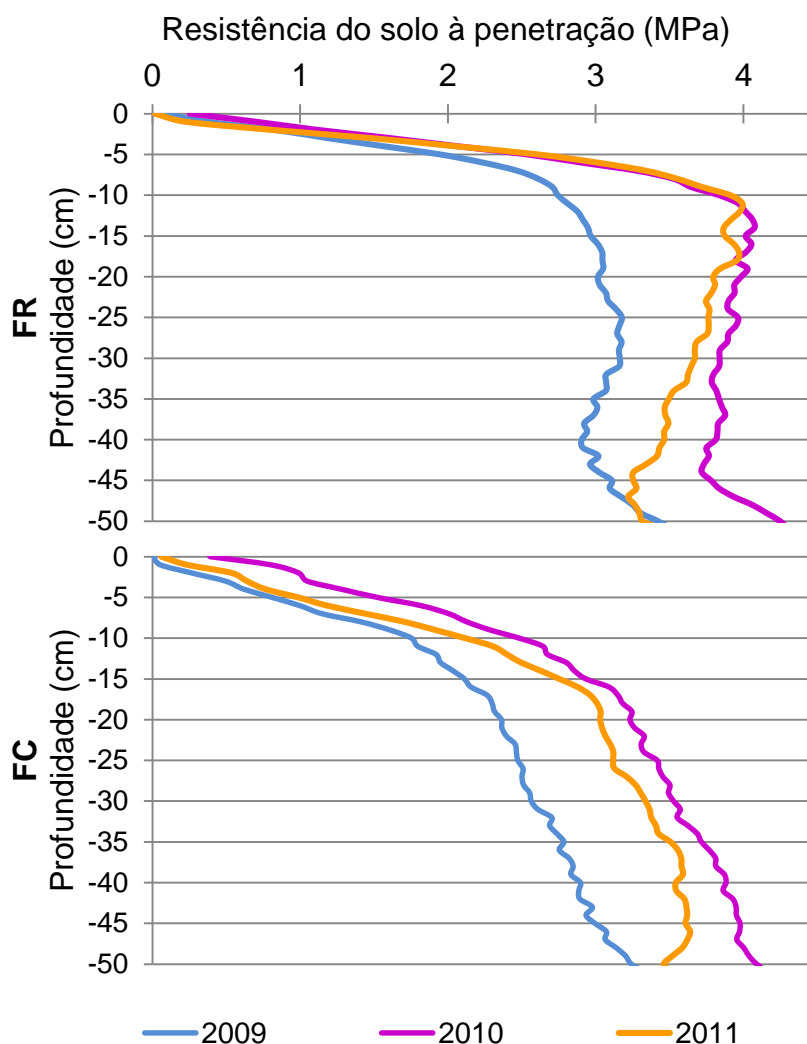


Figura 17. Valores médios da RMSP a cada 1 cm de profundidade na região FR e FC do tratamento C6 nos 3 anos de avaliação.

Para o horizonte superficial, a baixa compactação é justificada levando-se em conta que a colhedora utilizada possui sistema de esteira, e o conjunto de transbordo pneus de alta flutuação, proporcionando grande superfície de contato entre os rodados utilizados e a superfície trafegada, o que causa uma pressão relativamente menor na área superficial do solo.

Somando-se a esse fato, é importante destacar a presença da espessa camada de palha que é deixada sobre o solo a cada colheita, considerando o efeito dissipador que esta camada apresenta ao intermediar o contato direto dos



rodados com a superfície do solo, absorvendo parte da pressão, como afirma Braida (2004).

Pode-se dizer ainda que o aumento na área de contato dos pneus em função da carga dos veículos agrícolas poderia atenuar a compactação superficial do solo pelo tráfego das máquinas (Alakukku et al., 2003).

Adicionalmente à pressão de inflação, o tamanho e a resistência da carcaça do pneu controlam a distribuição dos estresses no solo (SOANE, 1986). A pressão aplicada ao solo é transmitida para camadas mais profundas em função da carga por eixo e pode alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo se a resistência mecânica interna dos elementos estruturais do solo for excedida (HORN; ROSTEK, 2000).

A ausência de tráfego na região da fileira de cana e a descompactação natural provocada pelas densas raízes que se desenvolvem próximo à soqueira podem justificar os menores níveis de RMSP nas camadas superiores nessa região, principalmente de 1-20 cm. Além disso, o efeito residual do revolvimento ocasionado na abertura do sulco de plantio pode ter favorecido a ocorrência dos menores valores até a profundidade de 30 cm, que equivale à profundidade máxima de ação do sulcador.

O cruzamento das curvas na profundidade de 30 a 35 cm, a partir da qual a região abaixo de FC apresenta maiores valores de RMSP em relação à FR, pode ser reflexo da pressão gerada na extremidade do implemento sulcador no momento do plantio, sendo distribuída até camadas inferiores.

Outro fator que pode colaborar para o aumento da RMSP com a profundidade na região FC é a propagação das tensões no solo (ângulo de espraiamento) conforme demonstrado na Figura 1, sendo que a partir de 20 cm de profundidade pode estar ocorrendo sobreposição das pressões exercidas pelos rodados de cada lado da soqueira na superfície do solo.

Além de detectar os efeitos do tráfego de máquinas na estrutura do solo para fins deste estudo, outra aplicação prática para os resultados é a detecção da camada compactada.

Por meio das informações dos gráficos, pode-se afirmar que a camada de maior RMSP está na profundidade de 10-20 cm na região FR e 40-50 cm para

região FC, na média dos tratamentos. Dessa forma pode-se afirmar que o PNT-titan é eficiente em apontar um adequado parâmetro na escolha e regulagem do implemento para descompactação do solo, se tornando muito importante para o planejamento do correto preparo do solo.

### 4.3.3 Distribuição espacial da RMSP

Na Figura 18 está representada a localização georreferenciada dos vértices amostrais obtidos em cada ano de avaliação do tratamento C3.

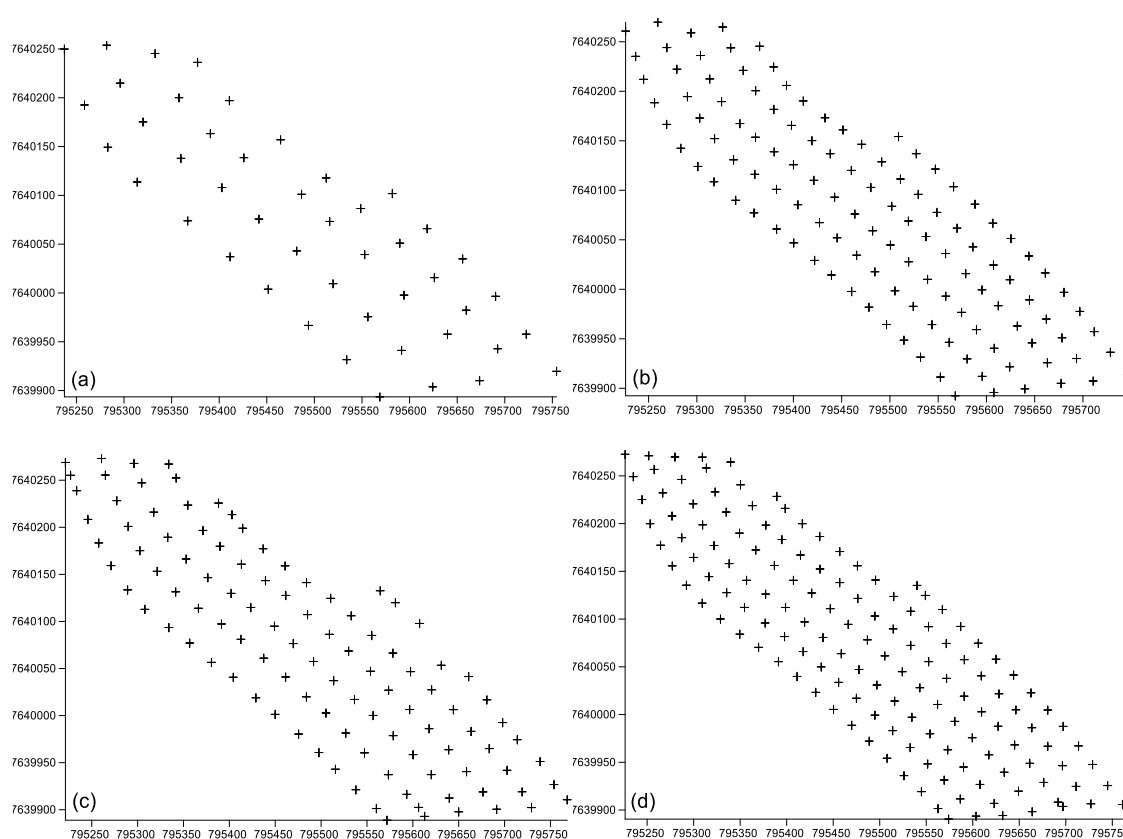


Figura 18. Vértices amostrais para coleta de dados de RMSP no tratamento C3 nos quatro anos de avaliação: (a) 2009; (b) 2010; (c) 2011; (d) 2012.

Conforme demonstrado da Tabela 5 a Tabela 8, maior densidade de pontuações pode ser observada no ano de 2012, correspondendo ao maior número de vértices na mesma área.

Os valores de RMSP de cada ponto amostrado foram interpolados pelo método do inverso do quadrado das distâncias, gerando os mapas para o detalhamento espacial da RMSP, permitindo visualizar regiões com mesmos valores nas áreas amostrais.

Nas imagens da

Figura 19 a Figura 22 estão os mapas gerados pelo software Surfer, representando os valores médios de RMSP em cada camada do tratamento C3. Os eixos horizontais e verticais indicam as coordenadas UTM, Leste no eixo das abcissas e Norte no eixo das ordenadas.

A partir da análise visual dos mapas é possível observar a variação espacial dos parâmetros de RMSP. A presença de distribuição espacial dos valores amostrados demonstra que é possível adotar sistemas de manejo seletivo, recomendando-se operações de preparo visando a descompactação do solo apenas nas áreas que se demonstram críticas ao correto desenvolvimento e crescimento das raízes das plantas, o que pode resultar em economia de energia no sistema.

As regiões com mesmos valores nas áreas amostrais são as que apresentam mesma coloração no mapa, sendo esse o parâmetro que possibilita a visualização da variação espacial da RMSP nos mapas.

Essa variabilidade pode ser explicada por diversos fatores e atributos que estão relacionados com a compactação e podem não ser homogeneamente distribuídos pela área total do solo, destacando-se a textura do solo (LARSON et al., 1980; IMHOFF et al. 2004), o conteúdo de carbono orgânico (STONE; EKWUE, 1995), o teor de água do solo durante as operações de campo (HORN et al., 1995) e a frequência e intensidade com que a carga é aplicada no solo pelas máquinas e implementos (HORN et al., 1995; CHAMEN et al., 2003).

Silva et al. (2004) confirma essa variabilidade espacial, afirmando que no campo, a RMSP é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas, além de ser dependente do teor de água solo.

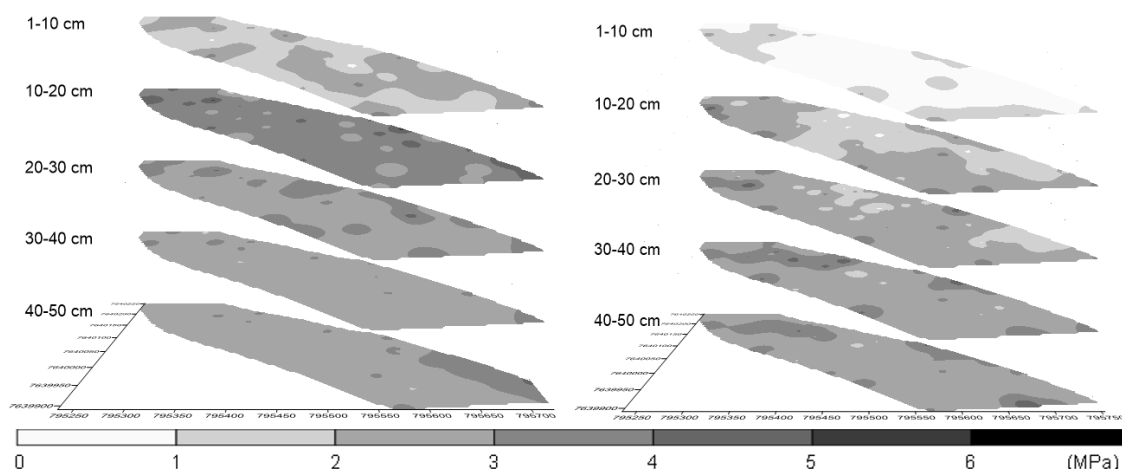


Figura 19. Mapas da variabilidade espacial da RMSD (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2009.

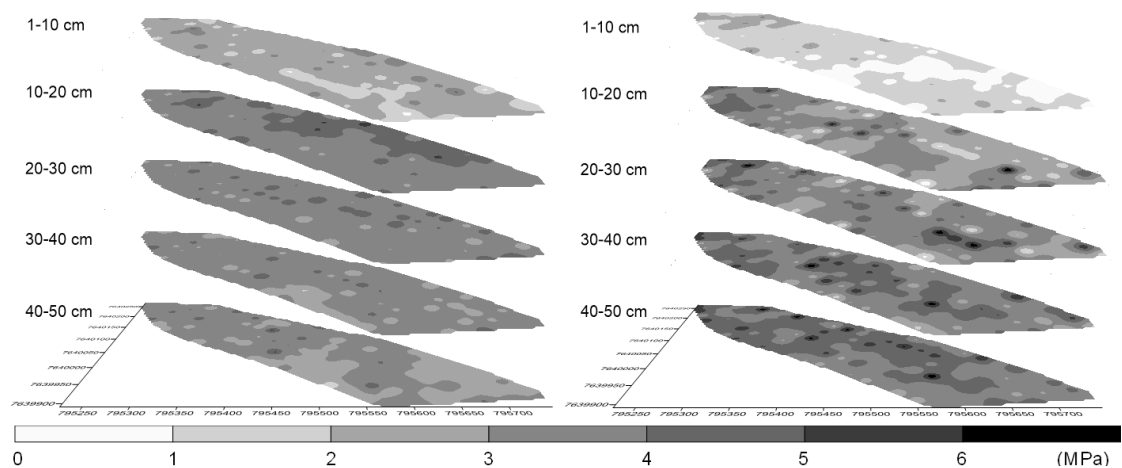


Figura 20. Mapas da variabilidade espacial da RMSD (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2010.

A variação espacial horizontal observada nos mapas não foi muito semelhante entre as duas regiões amostrais, porém nas diferentes camadas de cada região amostral é possível observar simetria nas manchas, representando que a variação espacial vertical em cada ponto é proporcional. A presença de valores mais elevados nas bordas dos mapas corresponde aos pontos amostrados na cabeceira do talhão, local onde se realizam as manobras, o que ocasiona maior compactação do solo.

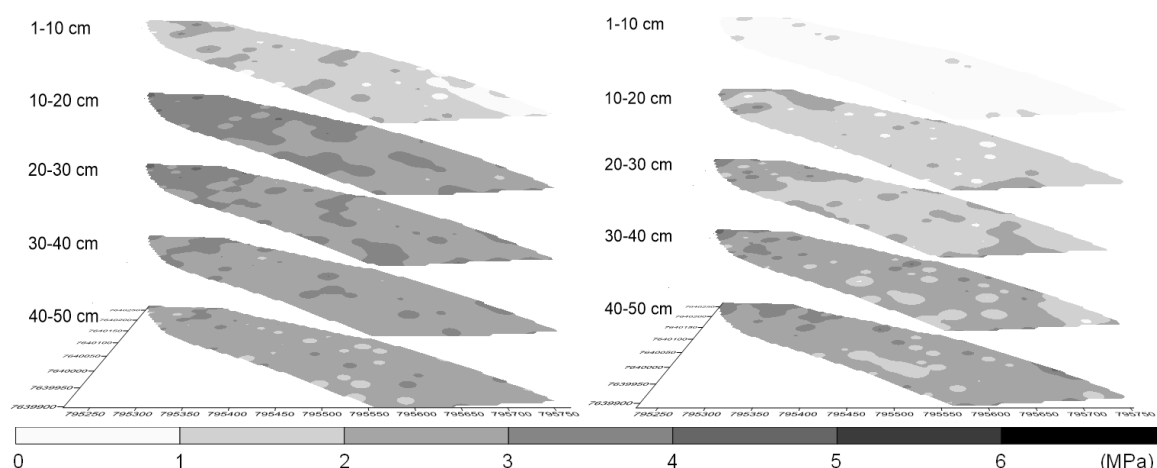


Figura 21. Mapas da variabilidade espacial da RMSD (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2011.

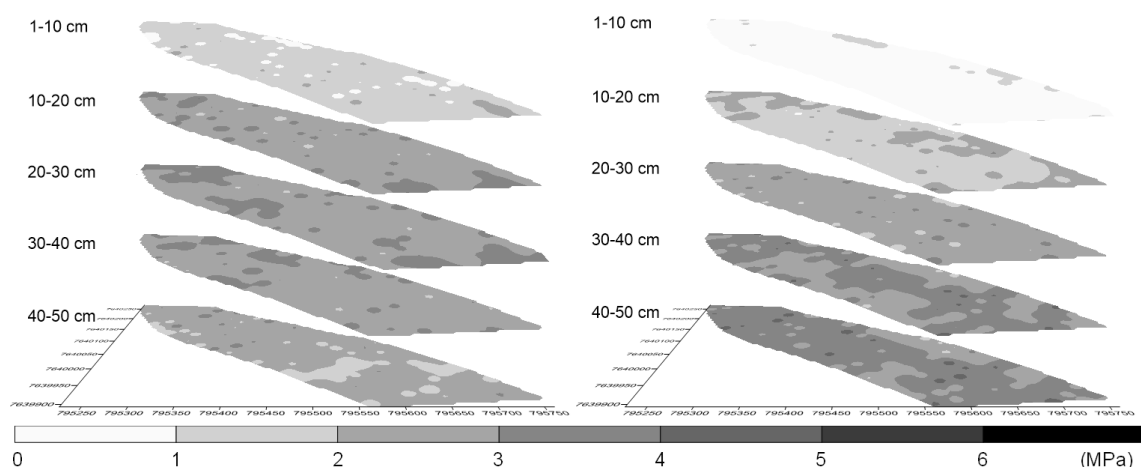


Figura 22. Mapas da variabilidade espacial da RMSD (MPa) nas camadas avaliadas para região FR (esquerda) e FC (direita) no tratamento C3 no ano de 2012.

Os dados apresentados na Figura 12, indicam que na média geral da região FC, apenas entre as camadas 31-40 e 41-50 cm não houve diferença significativa, portanto a semelhança na coloração geral observada entre os pares de mapas esboçam que os níveis são praticamente os mesmos. Explicação semelhante pode ser dada à região FR apenas nos anos 2011 e 2012 entre as camadas 11-20 e 21-30 cm.

Outro aspecto observado na análise visual desses mapas é o nível de RMSD das áreas, que permite fazer uma comparação rápida e direta do estado

de compactação do solo entre os tratamentos. Para isso sabe-se que as cores mais claras representam os menores valores de RMSP, e conforme as cores vão se tornando mais escuras significa que o local representado possui maiores valores de RMSP. Portanto os mapas que apresentam uma coloração mais escura são os que se encontram mais compactados, conforme a escala de cores adotada.

É possível afirmar que em todas as áreas representadas ocorreu predominância de valores entre 2 a 4 MPa, que é notado pelos tons de cinza médio, coincidindo com os resultados expostos na Figura 12, que também representa a média por camada de cada região. Também é possível afirmar que apenas na camada superficial ocorreram valores médios abaixo de 1 MPa, dada a ausência da coloração mais clara nas camadas mais profundas, correspondente ao intervalo de 0-1 MPa na escala.

Existe uma grande amplitude de valores de resistência mecânica do solo à penetração considerados críticos ao desenvolvimento de raízes, sendo geralmente adotado valores que variam de 1 a 4 MPa. Contudo, o valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas ainda é muito discutido, pois depende da densidade do solo, textura, tipo do sistema radicular, teor de água, entre outros fatores que direta ou indiretamente podem influenciar a resistência do solo (CANARACHE, 1990; MEROTTO JÚNIOR; MUNDSTOCK, 1999).

Para este trabalho os valores adotados seguiram as conclusões de Arshad et al. (1996) citado por Roque et al. (2003) de que em solos não mobilizados anualmente, como é o caso da cana-de-açúcar, os valores médios entre 2 e 4 MPa não são impeditivos ao crescimento radicular, afirmando que são toleráveis valores até 4 MPa.

Uma explicação para essa afirmação é que o solo não apresente para uma raiz, a mesma resistência à penetração que apresenta para uma haste metálica rígida com ponteira cônica e de diâmetro muito superior, a qual penetra o solo perpendicularmente.

Isto quer dizer que: (i) a raiz não necessariamente cresça apenas para baixo em direção perpendicular à superfície do solo como a haste do

penetrômetro faz; (ii) as raízes são constituídas de tecidos flexíveis e de diâmetro muito reduzido, a tal ponto que possibilite que elas se desenvolvam através do sistema poroso do solo, inclusive bioporos deixados por raízes decompostas e pequenos indivíduos do solo, conferindo um movimento pelo perfil à semelhança do realizado pela haste do penetrômetro, porém, sem enfrentar a mesma resistência, já que ela aproveita também os espaços vazios do solo.

Isso comprova a afirmação dos autores, já que em solos não mobilizados anualmente como em cana-de-açúcar, a ocorrência de bioporos é maior, assim como outros tipos de poros que se formam devido ao incremento da matéria orgânica que atua como agente cimentante na estruturação do solo.

Com base nos valores encontrados na bibliografia, as regiões consideradas críticas ocorreram apenas nos mapas da Figura 20, representados pela coloração cinza escuro, que correspondem aos valores de 4-5 e 5-6 MPa, chegando até nível mais crítico de 6 a 7 MPa (cor preta).

A principal razão dos valores mais elevados nesses mapas foi o baixo teor de água do solo no momento das avaliações.

Em alguns mapas foram detectadas regiões mais escuras na parte externa dos talhões, representada pela região da cabeceira onde ocorre maior pisoteio do solo devido à manobra das máquinas agrícolas, como afirmam Silva et al. (2004). Tal fato poderia ser mais evidente caso não tivesse feito prévio tratamento nos dados para exclusão dos pontos classificados como discrepantes (*outliers*).

Os pontos discrepantes visualizados no diagrama de caixa (Figura 12) estão relacionados com a existência de pontuações de tonalidade distinta nos mapas, representando valores extremos, identificados pelo forte contraste de tonalidade que apresentam em relação às regiões próximas no mapa. Essa relação é comprovada pois os *outliers* obtidos na análise dos dados foram geralmente de valores acima do máximo (abrangido pela calda superior), e as pontuações encontradas nos mapas são de valores superiores aos dos vizinhos, como se verifica na escala de cores apresentada na legenda dos mapas.

Essa análise é importante para assegurar a qualidade dos mapas gerados. O uso de ferramentas geoestatísticas pode ser demorado e muitas

vezes inviável em unidades agrícolas de grande porte. O presente trabalho buscou o uso de um método de interpolação simples e rápido para visualizar a distribuição espacial da compactação em um talhão comercial. O método do inverso do quadrado da distância estima o valor de uma região não amostrada pelo cálculo da média ponderada entre os vizinhos desta. A presença de valores extremos discrepantes deixa o mapa com pontuações e pode forçar as regiões vizinhas, superestimando ou subestimando os valores dessas, caso o ponto discrepante seja muito elevado ou reduzido respectivamente.

Os mapas de espacialização gerados foram condizentes com os dados da Figura 12, o que indica que apenas os mapas seriam suficientes para uma avaliação de planejamento agrícola, mostrando além da variabilidade dos dados, a forma como se distribuem no espaço e se é possível notar alguma tendência.



## 5 CONCLUSÕES

Não houve aumento dos valores médios de RMSP proporcional ao número de corte. As principais divergências encontradas podem ter sido ocasionadas pela diferença no teor de água do solo no momento das avaliações.

A comparação dos valores de RMSP e produtividade em TCH mostrou-se coerente, porém seria necessário isolar as variáveis como o fator climático para se obter conclusões mais precisas.

Pelo padrão de distribuição vertical dos valores de RMSP longo do perfil do solo entre as duas regiões avaliadas (FR e FC), pode-se dizer que o tráfego de máquinas causou alterações até 50 cm.

Os resultados são efetivos para indicar a camada de maior compactação, para fins de planejamento e parametrização do preparo do solo.

O mapas detectaram a variabilidade espacial da RMSP dentro dos talhões, demonstrando ser possível planejamento de técnicas de preparo localizado a fim de reduzir custos de produção agrícola, além de indicar as regiões mais afetadas pelo tráfego.

As camadas de cada mapa apresentaram manchas sobrepostas, demonstrando que a distribuição vertical segue amplitude proporcional à média do perfil em cada ponto. Não houve relação das manchas entre as duas regiões de cada tratamento, bem como entre os diferentes anos de avaliação de cada talhão, indicando que pontos amostrados em vértices diferentes geraram mapas distintos pela técnica do inverso do quadrado das distâncias.

## 6 REFERÊNCIAS

ACOSTA, J. J. B. Correlação entre o índice de cone (IC) e o modelo de capacidade de suporte de carga de solo de quatro solos da fazenda experimental lageado, FCA/UNESP-Botucatu. Dissertação (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

ALAKUKKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMERF, C. & SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 1. Machine/ soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160, 2003.

ALMEIDA, C.X.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; JORGE, R.F. & BARBOSA, J.C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2235-2243, 2008.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J. eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America, 1996

ASAE-American Society of Agricultural Engineers. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer: ASAE standard EP 542. St. Joseph: ASAE, 1999.

ASAE-American Society of Agricultural Engineers. Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.2. St. Joseph: ASAE, 1998.

ASSIS, R. L. de; LAZARINI, G. D.; LANCAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 29, n. 4, 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162009000400006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162009000400006&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 04 Ago. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000400006>.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S. Da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 7 – 18.

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeito da compactação do solo. *Lavoura Arrozeira*, v. 33, p. 59-62, 1980.

BENGOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41:341-358, 1990.

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 and environment analysis: Physical methods. 2.ed. New York, Marcel Decher. p.377-403, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, mai. 2002.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e *Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.639-645, 2006.

BIANCHINI, A.; MAIA, J. C. de S.; MAGALHÃES, P. S. G.; CAPPELLI, N.; UMEZU, C. K. Penetrógrafo eletrônico automático. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 6, n. 2, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662002000200024&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662002000200024&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 14 jul. 2011.

BONINI, A. K. Compactação de um latossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto e rendimento de grãos de trigo, soja e milho, 2006. 111f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Cascavel, 2006.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. The nature and properties of soils. Prentice Hall, 14th ed. 2008. 965 p.

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

BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, J.T.A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p.300-308, 2006.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.43, p.205-217, 1997.

CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Camargo e Alleoni, 1997.

CANARACHE, A. PENETR - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1, p.51-70, 1990.

CARBONERA, L. **Comparação entre diferentes penetrômetros para diagnósticos de compactação de solo**, 2007. 19 f. Relatório (Projeto de iniciação científica – PIBIQ) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. Disponível em: [www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/iniciacao/Lucelha.pdf](http://www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/iniciacao/Lucelha.pdf)>. Acesso em: 10 de jun. 2011.

CARVALHO, G. J. et al. Correlation between bean yield and soil penetration resistance under no-tillage. **Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto**, v. 10, n. 3, p. 765-771, 2006. ISSN 14154366 (ISSN). Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33846969583&partnerID=40&md5=31a7798bc5e6356a490a022fe93eeaf0>  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662006000300033&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662006000300033&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>.

CASTRO, O. M. **Comportamento físico e químico de um latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (Zeamays I.)**. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

CAVALIERI, Karina Maria Vieira et al. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissolo háplico. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, Jun. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832009000300001&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000300001&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 28 Jun. 2011

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMERD, C.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 2. Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 161-174, 2003.

CHAN, K.Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R.C.; DEAR, B.S.; PEOPLES, M.B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 13-21, 2006

CHANCELLOR, W.J. **Compaction of soil by agricultural equipment**. Davis: University of California, 1977. 53p. (Bulletin, 1881).

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acomp. safra Bras. cana-de-açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n.1 - Primeiro Levantamento, Brasília, p. 1-20, abr. 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_04\\_15\\_15\\_44\\_37\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_1o\\_lev\\_-\\_14.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_04_15_15_44_37_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_14.pdf)>. Acesso em: 09 mai. 2014.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira : cana-de-açúcar, primeiro levantamento, maio/2011** - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab 2011. Disponível em:

<[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_05\\_27\\_11\\_53\\_13\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_maio\\_2011\\_1o\\_lev..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_27_11_53_13_boletim_cana_portugues_-_maio_2011_1o_lev..pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2011.

CUNHA, J.P.A.R. da; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.

DALLABRIDA, R da C. **Ensaio de pneus agrícolas e o uso da agricultura de precisão no combate a compactação dos solos**. 2008. 42 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. Applications of S-Theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & development**, 2007.

DIAS JUNIOR, M. De S; MIRANDA, E. E. V. de. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência Agrotecnica**, Lavras. v.24. n. 2, p.337-346. 2000.

DLG AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL LTDA. Setor de publicações técnicas. **Manual do usuário: Penetrômetro Geo-Refenciado Motorizado**. Rev.: 2.00-08. 2008. Disponível em: <[www.dlg.com.br](http://www.dlg.com.br)>. Acesso em: 10 set. 2009, 8:9.

ELBANNA, E. B.; WITNEY, N. D. Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight. **Jornal of Terramechanics**, v. 24, n. 1, p. 41 – 56, 1987.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de levantamento e conservação do solo. **Manual de métodos e análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. (não pag.)

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.113-121, jan./abr. 2006.

GIMENEZ, D.; ALLMARAS, R. R.; HUGGINS, D. R.; NATER, E. A. Prediction of the saturated hydraulic conductivity/porosity dependence using fractals. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, p. 285-1292, 1997.

GOMES, A. de S.; PEÑA, Y.A. Caracterização da compactação através do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.49, n.1, p.18-20, 1996.

GONZALEZ, F. L. **Morfologie propriétés physiques et conditions de formation del elements structurax de la conche laborée**: contribution à l'

interprétation du profil cultural. Paris, 1991, 133 f. These (Doctorat Ingénierie Agronomique) - Institut National Agronomique.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, p.163 – 189, 1980.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer mapping system**. Version 10. Golden: Golden Software, 2011.

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

HÅKANSSON, I. and VOORHEES, W.B., **Soil compaction**. In: Lal, R., Blum, W.H., Valentine, C. and Stewart, B.A. (eds.) *Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press, New York, 1998 pp. 167-179.

HÅKANSSON, I. Soil compaction control: objectives, possibilities and prospects. **Soil Technol.**, 3:231-239, 1990.

HOLLAND, J. E. **Changes in soil physical properties under raised bed cropping**. 2007. 274f. Tese (Doutorado) - Universidade de Melbourne, Melbourne, 2007.

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

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, . D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Netherlands: Elsevier, p. 45-69, 1994.

HORN, R.; ROSTEK, J. Subsoil compaction processes – state of knowledge. In: HORN, R.; VAN DEN KKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J. (Ed.). **Subsoil compaction: distribution, processes and consequences**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2000. p. 44-54. 34

HORN, R.; WAY, T. & ROSTEK, J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. **Soil Till. Res.**, 73:101-106, 2003.

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

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 17-24, 2004.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações de curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

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

KOOLEN, A.J.; KUIPERS, H. **Agricultural soil mechanics**. Germany: Springer-Verlag, 1983. 242p.

LANÇAS, K. P.; SANTOS FILHO, C.A. Penetrômetro-hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo. La Plata, Editorial de la U.N.L.P. p. 570-576. 1998.

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

LETEY, J. The study of soil structure: science or art. **Aust. Journal Soil**, Australia, v. 29, p. 699-707, 1991.

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

LÜTTICKEN, R. E. Automation and Standardisation of Site Specific Soil Sampling. *Precision Agriculture*, 2, p.179-188, 2000

MARCOLIN, C. D. **Uso de Funções de Pedotransferência entre Atributos Físicos de Solos sob Plantio Direto**, 2009. 187 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, 2009.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.27, p.1149-1159, 2003.

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

MISRA, R.K. et al. Maximum axial and radial growth pressure of plant roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.98, p.315-326, 1986.

MOLIN, J.P.; SILVA JÚNIOR, R. L. da. Variabilidade espacial do índice de cone, correlacionada com textura e produtividade. *Engenharia Rural*, v.14, 2003.

MOSADDEGHI, M.R.; KOOLEN, A.J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; LERINK, P. Comparisons on different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structure soils. **Journal of Terramechanics**, London, v.44, n.1, p.53-63, 2007.

OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. de. **Compactação do solo devido ao tráfego de carretas florestais com dois tipos de pneus inflados a duas pressões diferentes**. 1998. 78 f. Tese (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

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 - MG, v.28, n.5, p.911-917, 2004.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 521-529, 2001.

PEREIRA, J.O.; SIQUEIRA, J.A.C.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, S. de L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.171-174, 2002.

PIMENTEL-GOMES, F. 2000. **Curso de estatística experimental**. 22 ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 363 p.

RAMOS, A. W. **Controle estatístico de processos para pequenos lotes**. São Paulo: Fundação Vanzoline, Edgard Blucher Ltda, 1995. 151p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri: Manole, 2004, 478 p.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia, base para distinção de ambientes**. 5 ed. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322 p.

RIBEIRO, C. A. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), 2010. 69f. Tese (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

RIBON, A.; CENTURION, J.; CENTURION, M.; PEREIRA, G. Densidade e resistência a penetração de solos cultivados com seringueira sob diferentes manejos - DOI: 10.4025/actasciagron.v25i1.2147. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Brasil, 25 abr. 2008. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2147>>.

RÍPOLI, T.C.C. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: CALQ, 1985. 34p.



ROQUE, C.G.; CENTURION, J.F.; ALENCAR, G.V.; BEUTLER, A.N.; PEREIRA, G.T.; ANDRIOLI, I. **Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos.** Acta Scientiarum, v.25, n.1, p.53-57, 2003.

ROSOLEM, C. A. Interpretação de análise de solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. In: Seminário sobre Tecnologias de Manejo de Solo e Adução da Cana-de-açúcar, 1, 1994, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: p.53-73. 1994.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, v.5, p.821-828, 1999.

SANTOS, H. G. dos; OLIVEIRA, J. B. de; ANJOS, L. H. C. dos; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. A. de; COELHO, M. R.; LUMBRELAS, J. F. (Ed. Téc.) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SCHÄFER-LANDEFELD, L.; BRANDHUBER, R.; FENNER, S.; KOCH, H-J. & STOCKFISCH, N. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. **Soil Till. Res.**, 75:75-86, 2004.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W. & SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery: Soil physical and mechanical aspects. **Soil Till. Res.**, 93:28-43, 2007.

SCHNEIDER, P.; KLAMT, E.; GIASSON, E. Morfologia do solo: **subsídios para caracterização e interpretação de solos a campo**. Guaíba: Agrolivros, 2007. 72 p.

SEIXAS, F. Pneus: **Qual a adequada pressão de insuflagem?** Piracicaba: IPEF, 1996 4p. (IPEF. Circular Técnica, 185).

SENE, M. et al. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Sci Am J**, Madison, v.49, p.422-427, 1985.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.F.C.; COSTA, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.404-413, 2010.

SIANSI, F. L.; MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; CORTEZ, L. A. Subsolação localizada em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico. In: 19 **Simpósio Internacional de Iniciação Científica**, 2011, Piracicaba- ESALQ (USP). 19 Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2011.

SILVA, M. L. L. E. **Influencia da densidade e do teor de agua do solo no indice de cone de um latossolo vermelho escuro**. 1994. 98 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI. , Campinas.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, mar-abr, 2004.

SMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SP. **Etanol Verde: Protocolo Ambiental - resultados das safras**. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/index.php>>. Acesso em: 07 mai. 2014.

SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C, Soil compaction problems in words agriculture. In: -----. Soil compaction in crop productions. **Developments in Agricultural Engineering**, Elsevier: Amsterdam, 1994. 662 p. v. 11.

SOANE, G. C.; GODWIN, R.J.; SPOOR, G. Influence of deep loosening techniques and subsequent wheel traffic on soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 8, p. 231-237, 1986.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; MARQUES JUNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, jan-fev, 2006.

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

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 60, p. 15-24, 1995.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ci. Rural**, 34:755-760, 2004.

SWEENEY, D.W.; KIRKHAM, M.B.; SISSON, J.B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 637-643, 2006.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; QUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 25, p. 725-730, 2001.

TOLEDO, A. ; RIBEIRO, C. A. ; FURLANI, C. E. A. ; SILVA, R. P. . Penetrógrafo eletrônico automático acoplado a quadriciclo para aplicação em agricultura de precisão. In: VII Congresso Brasileiro de Agroinformática, 2009, Viçosa - MG. **Anais...** Lavras - MG : SBIAgro, 2009. v. 1. p. 1-6.

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

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

VANDENBERG,G.E.; GILL,W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, v.5, n.2, p.105-107, 1968.

YAVUSCAN, H.G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 200-215, 2005.