

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREAS DE PLANTIO DIRETO COM E SEM  
ESCARIFICAÇÃO**

**INDIAMARA MARASCA**

Orientador: Kleber Pereira Lanças

Co-Orientador: Reginaldo Barboza da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Botucatu – SP

Junho – 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E  
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E  
DOCUMENTAÇÃO UNESP -FCA -  
LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Marasca, Indiamara, 1986-  
M311a Atributos físicos do solo em área de plantio direto  
com e sem escarificação / Indiamara Marasca. Botucatu:  
[s.n.], 2010  
vii, 61 f.: il., color., grafs., tabs.

Dissertação(Mestrado) -Universidade Estadual  
Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2010  
Orientador: Kleber Pereira Lanças  
Co-orientador: Reginaldo Barboza da Silva  
Inclui bibliografia.

1. Densidade do solo. 2. Pressão de pré-  
consolidação.  
3. Índice de cone. I. Lanças, Kleber Pereira. II.  
Silva,  
Reginaldo Barboza da. III. Universidade Estadual  
Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).  
Faculdade  
de Ciências Agrônômicas de Botucatu. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO: "ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM NITOSSOLO VERMELHO COM E SEM  
ESCARIFICAÇÃO"

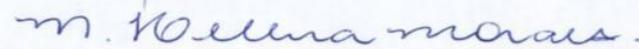
ALUNA: INDIAMARA MARASCA

ORIENTADORA: PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. RENATO LARA DE ASSIS

  
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. MARIA HELENA MORAES

Data da Realização: 18 de junho de 2010.

À minha mãe

*Inês Lucia Marasca,*

a minha profunda gratidão pela lição de vida,  
dedicação, apoio, compreensão e auxílio que  
me fortalecem a cada dia.

*DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campos de Botucatu e ao Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade que me foi concedida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Kléber Pereira Lanças pela orientação e conhecimentos transmitidos e ao Co-orientador Reginaldo Barbosa da Silva, pela orientação e amizade.

Em especial a Fernanda Coelho Gonçalves pela amizade, ajuda e conhecimentos transmitidos.

A todos os Funcionários do Departamento de Engenharia Rural pelos ensinamentos e cordialidade.

Às amigas Ana Paula Barbosa e Alessandra Flagiolo da Silva pela amizade, atenção.

Aos Técnicos Maury Torres da Silva, Emanuel Spadim pelas colaborações e amizade.

Aos Professores Maria Helena de Moraes, Paulo Roberto Arbex Silva pelas sugestões e contribuição na elaboração da Dissertação.

Aos colegas do NEMPA (Thiago Machado, Fabrício Campos Masiero, Leonardo de Almeida Monteiro, Gabriel Lyra) e Neilor Bugoni Riquetti, pela amizade, atenção e ajuda na coleta dos dados e a todos que direta e indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Ao Junior Batista Masqueto pela atenção e concertos prestados.

A todos os funcionários das Fazendas de Ensino, Pesquisa e Produção, em especial a Mário de Oliveira Munhoz, Antonio Rodrigues e ao Saulo F. Gomes de Sousa pelo auxílio técnico e esforço para realização do experimento.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
4.1 Efeito do manejo do tráfego agrícola em áreas Plantio Direto.....	7
4.2 Avaliações mecânicas.....	9
4.2.1 Compressibilidade do solo.....	10
4.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração.....	13
4.3 Avaliações físicas do solo.....	16
4.4 Avaliações hídricas do solo.....	17
4.5 Avaliações químicas do solo.....	18
4.6 Variabilidade espacial de dados amostrais do solo.....	19
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
5.1 Caracterização da área experimental.....	23
5.2 Capacidade de suporte de carga do solo (CSCS).....	25
5.3 Resistência do solo à penetração.....	28
5.4 Atributos físicos do solos .....	28
5.4.1 Teor de água no solo.....	28
5.4.2 Densidade do solo.....	29
5.4.3 Densidade de partículas.....	29
5.4.4 Textura do solo e argila dispersa em água.....	29
5.4.5 Índice de floculação.....	30
5.4.6 Limites de consistência.....	30
5.4.7 Macro e micro porosidade do solo e volume total de poros.....	31
5.4.8 Porosidade total.....	31
5.5 Atributos químicos do solos .....	32
5.5.1 Complexo sortivo.....	32

5.5.2 Matéria orgânica.....	32
5. 6 Análise geoestatística e estatística dos dados amostrados.....	32
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
6.1 Análise química do solo.....	34
6.2 Análise físicas do solo.....	35
6.3 Resistência do solo à penetração.....	39
6.4 Compressibilidade do solo.....	46
7 CONCLUSÃO.....	50
8 REFERÊNCIAS .....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Curva de compressão do solo mostrando a curva de compressão secundária, reta de compressão virgem com suas regiões de deformações elásticas e plásticas, respectivamente, a posição da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), e o índice de compressão ( $m$ ) (DIAS JUNIOR,1994).....	12
2. Área experimental de Plantio direto, com escarificação (a) e sem escarificação (b).....	24
3. Mapa do Brasil com detalhe do Estado de São Paulo, localização do município de Botucatu/SP, da Fazenda Experimental Lageado e a área de estudo.....	24
4. Unidade Móvel de Amostragem do solo (UMAS).....	25
5. Coleta de anéis para compressibilidade com a UMAS.....	26
6. Equipamentos laboratoriais para realização dos ensaios de compressibilidade: suporte do anel, anel e placa porosa (a). Consolidômetro (b) desenvolvido por Silva et al. (2005).....	27
7. Penetrômetro hidráulico-eletrônico instalado na UMAS – Unidade Móvel de Amostragem do Solo.....	28
8. Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC).....	30
9. Semivariogramas da resistência à penetração do sistema de Plantio direto com escarificação 0 a 0,10 m (a) e 0,30 a 0,40 m (b).....	41
10. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 0 a 0,40 m do sistema de Plantio Direto com escarificação, interpolados pelo inverso do quadrado da distância.....	42
11. Semivariogramas da resistência a penetração do sistema de Plantio direto sem escarificação 0 a 0,30 m (a) e 0,30 a 0,40 m (b).....	44
12. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 0 a 0,40 m sistema de Plantio Direto sem escarificação, interpolados pelo inverso do quadrado da distância.....	45
13. Gráfico de Índice de Cone do solo nas áreas de plantio direto com e sem escarificação.....	46

**LISTA DE EQUAÇÕES**

<b>Equações</b>	<b>Página</b>
1. Umidade gravimétrica .....	29
2. Densidade do solo.....	29
3. Índice de flocculação.....	30
4. Microporosidade.....	31
5. Porosidade total.....	32

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabelas</b>	<b>Página</b>
1. Análises químicas do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e profundidades no sistema plantio direto. Botucatu, Laboratório de Fertilidade do Solo da FCA/UNESP, 2010.....	34
2. Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas para os diferentes sistemas de manejo e profundidades no sistema plantio direto.....	35
3. Índice de floculação (IF), argila dispersa em água (ADA) e argila total (AT) do Nitossolo Vermelho em porcentagem.....	36
4. Densidade do solo em ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) de um Nitossolo Vermelho em relação ao manejo em relação a profundidade.....	37
5. Porosidade total de um Nitossolo Vermelho em função do manejo e em profundidade.....	37
6. Macroporosidade de um Nitossolo Vermelho em relação ao manejo e em profundidades.....	38
7. Microporosidade de um Nitossolo Vermelho em função ao manejo e em profundidade.....	38
8. Análise descritiva do índice de cone (kPa) para a área de Plantio Direto com escarificação.....	40
9. Modelos e parâmetros dos variogramas do índice de cone para a área de Plantio Direto Com Escarificação.....	41
10. Análise descritiva de índice de cone para área de Plantio Direto sem escarificação.....	43
11. Parâmetros do variograma da resistência do solo à penetração em área de Plantio Direto sem escarificação.....	43
12. Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho em (kPa) com teste de médias para manejos e em relação a profundidades.....	47
13. Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho para PDCE em (kPa) na relação área de consistência em relação a profundidades.....	48
14. Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho para PDSE em (kPa) na relação área de consistência em relação a profundidades.....	49

## 1 RESUMO

O sistema de plantio direto vem sendo empregado em diversas regiões do Brasil; porém, dependendo do local e da intensidade do tráfego de máquinas, tem provocado a compactação do solo e muitos produtores utilizam como solução a escarificação da área para romper a camada que diminui o crescimento das plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da escarificação (0,30 m) nas propriedades físicas de um Nitossolo Vermelho distroférico, comparando os resultados com uma área contígua não escarificada, ambas conduzidas, anteriormente, pelo sistema de plantio direto. Para a determinação da resistência mecânica à penetração, densidade e pressão de pré-consolidação do solo foram amostradas as duas áreas de plantio direto, com escarificação (PDCE) e sem escarificação (PDSE). Utilizando-se a UMAS – Unidade Móvel de Amostragem do Solo, construída pelo NEMPA - Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais da FCA/UNESP de Botucatu/SP, equipada com GPS, possibilitando o georeferenciamento dessas amostras. A resistência mecânica do solo à penetração de um cone foi obtida através do penetrômetro hidráulico-eletrônico e as outras propriedades foram avaliadas em laboratório através da coleta de anéis padronizados. A amostragem foi realizada no sistema de malha (“grid”) seguindo as dimensões de 15 x 25 m para a resistência à penetração do solo e para a amostragem com anéis numa dimensão de 15 x 50 m, sendo coletados 160 anéis. As amostras com anéis, para a determinação da densidade e para o ensaio no consolidômetro, foram coletadas nas camadas de 0 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m, 0,20 a 0,30 m e 0,30 a 0,40 m e com os dados obtidos com o penetrômetro foram calculados os índices de cone para essas mesmas

camadas. Com os dados obtidos e calculados foram construídos e comparados os mapas desse atributo para as áreas escarificada e não escarificada (Plantio Direto). Para o ensaio com o consolidômetro foram utilizados os anéis com amostras indeformadas obtendo-se a capacidade de suporte de carga do solo. O manejo do solo adotado proporcionou diminuição na densidade do solo no plantio direto com escarificação nas profundidades de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Os dados de macroporos, microporos e a porosidade total para o solo estudado permitiu concluir que não apresentou variação da escarificação nestes atributos físicos para as diversas profundidades, após 2 anos de mobilização do solo. A pressão de preconsolidação em associação com a consistência do solo possibilitou identificar que no manejo PDCE, todas as camadas quando submetidas ao teor de água referente à faixa de fiabilidade ofereceram uma maior capacidade de suporte de carga do solo e no PDSE, isto só foi possível na camada de 0 a 0,10 m, evidenciando a maior consolidação desta camada. A escarificação promoveu melhores condições físicas do solo, tais como a redução da resistência à penetração entre as profundidades, mostrando as vantagens em relação ao plantio direto sem escarificação (PDSE). O atributo de resistência do solo à penetração apresentou dependência espacial ajustando-se ao modelo exponencial nas profundidades de 0,20 a 0,30 e 0,30 a 0,40 m para PDSE e 0,10 a 0,20 e 0,30 a 0,40 m para PDCE. A profundidade de 0,30 a 0,40 m do manejo de PDSE apresentou o maior alcance (102,3 m) e, conseqüentemente, a menor variabilidade espacial na área.

## 2 SUMMARY

### PHYSICAL ATTRIBUTES OF SOIL IN PLANTATION AREAS WITH AND WITHOUT SCARIFICATION DIRECT

Botucatu, 2010, 61 f.

Dissertation (Master of Agronomy) - Faculty of Agricultural Sciences, Universidade Estadual Paulista

Author: INDIAMARA MARASCA

Advisor: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

Co-advisor: REGINALDO BARBOSA DA SILVA

The no-tillage system has been used in several regions of Brazil, but depending on the location and intensity of machinery traffic has caused soil compaction and many producers use as a solution to scarification of the area to break the layer decreases plant growth. The aim of this study was to evaluate the influence of scarification (0.30 m) on physical properties of an Alfisol dystrophic, comparing the results with a contiguous area not scarified, both conducted previously by the system of tillage. To determine the penetration resistance, density and pressure of pre-consolidation of soil were sampled both areas of tillage, with scarification (PDCE) and without scarification (PDSE). Using the MUSS - Mobile Unit of Soil Sampling, built by NEMPA – Nucleus for Agronomic and Forest Machines and Tires Tests and FCA/UNESP, Botucatu/SP, equipped with GPS, allowed the georeferencing of these samples. The mechanical resistance to penetration of a cone penetrometer was obtained through the hydraulic-electronic and other properties were evaluated in the laboratory by collecting rings

standardized. The sampling was performed at loop system ("grid") following the dimensions of 15 x 25 m for the penetration resistance and soil sampling rings with a dimension of 15 x 50 m, and collected 160 rings. Samples with rings for determining the density and test in consolidometer were collected in layers of 0 to 0.10 m, 0.10 to 0.20 m, 0.20 to 0.30, 0.30 to 0.40 m with the data obtained with the penetrometer were calculated for a cone to those layers. With the data collected and calculated were constructed and compared this attribute maps for the areas scarified and not scarified (Tillage). For the test with consolidometer rings were used with undisturbed samples to derive the load-bearing capacity of soil. Soil management adopted provide a decrease in the density of soil tillage with chiseling at depths from 0.0 to 0.10, 0.10 to 0.20 m. Data from macro pores, micro pores and total porosity for the sandy soil showed that no significant variation of chiseling these physical attributes for the various depths, after two years of mobilization of soil. The preconsolidation pressure in association with the consistency of the soil enabled the identification that the management PDCE, all layers when exposed to water content on the range of reliability offered a higher load bearing capacity of soil and PDSE, this was only possible in the 0 to 0.10 m, suggesting a greater consolidation of this layer. Scarification promoted better soil physical conditions, such as reduced penetration resistance between the depths, showing the advantages in relation to tillage without scarification (PDSE). The attribute of resistance to penetration showed spatial dependence adjusting to the exponential model at depths of 0.20 to 0,30; 0,3 to 0,40 m for PDSE and from 0.10 to 0.20, 0.30 to 0,40 m for PDCE. The depth from 0.30 to 0.40 m in the management of PDSE showed the greatest range (102.3 m) and consequently lower spatial variability in the area.

**Key words:** cone index, pre-consolidation pressure, soil density

### 3 INTRODUÇÃO

A descompactação do solo utilizando implementos com haste, como os escarificadores mobiliza o solo para adequar as áreas de cultivo para o plantio, aumentando a aeração, descompactando o solo, para que as raízes se desenvolvam aproveitando o máximo possível do solo e refletindo na produtividade da cultura. Caso este preparo não venha a ser feito de forma correta pode ocasionar modificações nos atributos físicos do solo, prejudicando o desenvolvimento das plantas.

O solo, devido ao trânsito de máquinas pesadas e aos manejos que acompanham a necessidade de cada propriedade, sofre com a compactação que aumenta gradativamente ao longo dos anos.

O sistema de plantio direto é uma premissa básica para se obter uma superfície com cobertura vegetal permanente no solo, que o proteja e evite a erosão excessiva, sendo que neste sistema a movimentação do solo é realizada somente na linha da semeadura e a rotação de cultura, que está relacionada com uma melhora física, química e biológica do solo, deve ser sempre adotada quando possível. O aumento da matéria orgânica melhora a temperatura e a estrutura do solo, ocasionando uma conservação e proteção do solo para as mais diversas regiões brasileiras. Por outro lado, o tráfego de máquinas com equipamentos de preparo contribui para o aparecimento de áreas com maior resistência do solo à penetração das raízes.

A compactação do solo passa a ser uma causa de prejuízo na produção, limitando o crescimento das raízes e, conseqüentemente, a adsorção dos nutrientes e água, o que leva a planta a um desenvolvimento aéreo inadequado, abaixando a produtividade das culturas.

Identificada a área de compactação e a profundidade da sua ocorrência, uma solução, que vários produtores têm recomendado para romper a camada compactada do solo é a utilização da operação de escarificação, até uma profundidade de 0,30 a 0,35 m, sendo que a eficiência da operação é aumentada quando são utilizados em solo tendendo a seco.

Dentre as propriedades físicas do solo que se alteram com a compactação, estão o aumento na densidade do solo, a redução da aeração, a alteração na disponibilidade de nutrientes e o fluxo de água.

Diversos pesquisadores vêm afirmando que o grau de compactação do solo desejado para a tração de máquinas, difere daquele ideal para a infiltração de água, ar e nutrientes e o crescimento radicular das plantas; portanto, a compactação deve ser mantida em níveis compatíveis com a cultura instalada.

A análise da capacidade de suporte de carga do solo, através da utilização dos dados obtidos em um consolidômetro, permite obter a máxima pressão exercida sobre um solo e, com isso, decisões podem ser tomadas para evitar uma compactação indesejada do solo, de forma a tornar viável o cultivo de plantas comerciais.

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo comparativo da compactação do solo através do índice de cone, da densidade do solo e da capacidade de suporte de carga do solo, em áreas de plantio direto com e sem escarificação posterior.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Efeito do manejo do tráfego agrícola em áreas de Plantio Direto**

Os precursores dessas novas tecnologias se ressentiam da falta de equipamentos específicos que mobilizassem de forma drástica e definitiva o solo anteriormente manipulado com as técnicas convencionais, rompendo assim as camadas compactadas do solo remanescentes para que pudessem implantar os sistemas conservacionistas sem sofrerem as conseqüências nocivas e duradouras das operações anteriormente adotadas. Desta forma, a subsolagem do solo passou a ser uma operação obrigatória antes da implantação do sistema de plantio direto e, hoje em dia, é uma recomendação fundamental para o sucesso desse sistema (LANÇAS, 2002).

O sistema plantio direto (PD) foi desenvolvido buscando a sustentabilidade da produção agrícola sendo comprovadamente eficiente no controle de erosão Resck (1999) e especialmente adequado para as regiões tropicais Romeiro (1998), evitando a exposição do solo à intensa ação do sol e da chuva. No entanto, a reduzida movimentação do solo, restrita a linha de semeadura, ocasiona aumento da densidade do solo podendo acarretar, então, a redução na produtividade das culturas (LAL et al., 1989).

Para Ripoli e Ripoli (2004), a missão de gerenciar o tráfego de máquinas agrícolas requer além de um planejamento operacional consolidado, três requisitos básicos: ajustes para controle de pisoteio; estrutura de controle das atividades e recursos para

tomada de decisão. O pisoteio dos terrenos agrícolas canavieiros, decorrentes do deslocamento de máquinas e veículos, certamente pode ser controlado por três tipos de ajustes entre os diferentes tipos de agentes de pisoteio. Estes ajustes são os seguintes: ajuste vertical ou da intensidade das cargas aplicadas; ajuste horizontal ou da distribuição das cargas no solo; ajuste direcional ou da aproximação relativa rodado-planta.

O ajuste vertical diz respeito às cargas normais aplicadas no terreno cultivado pelo rodado das máquinas agrícolas e veículos de transporte. Seu objetivo é a redução da pressão de recalque do solo, na região explorada pelo sistema radicular.

O tráfego contínuo de equipamentos pesados e o preparo dos solos tem sido motivo de preocupação e traz a tona a necessidade de avaliar o comportamento da estrutura do solo, a fim de evitar os efeitos indesejáveis da compactação, que vem sendo considerado um fator determinante na obtenção da produtividade agrícola reduzida (CARDOSO et al., 2008).

Para Silveira (1988), escarificar significa romper o solo da camada arável de 15 a 30 cm com o uso de implementos denominados escarificadores. Esses são implementos de hastes que são utilizados no preparo primário do solo, e que apresentam vantagens sobre os implementos de discos pelo fato de não promoverem uma inversão da camada de solo obtendo-se, com isto, maior capacidade operacional e principalmente menor alteração da estrutura do solo. Devem ser utilizados para descompactar o solo, rompendo camadas compactadas, facilitando a penetração das raízes e a infiltração da água no solo.

A escarificação do solo pode ser adotada para reduzir a compactação em plantio direto e, conseqüentemente, diminuir a densidade e principalmente a resistência mecânica à penetração do solo (INOUE et al., 2002).

Os modelos obtidos de capacidade de suporte de carga dos solos em função da pressão de preconsolidação e do teor de água foram suficientemente sensíveis para a identificação da degradação da estrutura, identificando as camadas e as áreas de maior resistência mecânica, assim como possíveis irregularidades quanto à qualidade das operações de preparo do solo no talhão de cana-de-açúcar (MIRANDA et al., 2007).

Também, em função da forma como o sistema de plantio direto é conduzido, ou seja, como é gerenciado o tráfego de máquinas no trato cultural e na colheita, principalmente no tocante ao estado de umidade do solo durante essas operações e o tipo de

rodado do maquinário utilizado, o agricultor se vê obrigado a interromper o ciclo de plantio sem mobilização do solo, sendo então recomendado o rompimento das camadas compactadas que passam a influir significativamente no crescimento das raízes, infiltração e capilaridade da água, absorção de nutrientes e troca catiônica e, finalmente, na produtividade das culturas (LANÇAS, 2002).

As colhedoras que trafegam sobre um solo aplicam quase a totalidade de sua energia no sentido de movimentar as suas partículas, umas contra as outras, gerando uma diminuição dos poros e provocando o surgimento da compactação. Novas máquinas colhedoras com esteiras metálicas ou de borracha têm sido apresentadas para concorrer com as máquinas de rodados de pneus (MARASCA et al., 2009).

De acordo com Lanças et al. (2000), a compactação do solo não é uma propriedade do solo e sim o efeito da variação de algumas de suas propriedades, devido à ação de cargas externas, tais como o tráfego de máquinas e a ação de ferramentas agrícolas.

Para Gupta et al. (1989), a pressão externa sobre o solo imposta por veículos e implementos agrícolas nas atividades de cultivo tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação do solo. Fatores relacionados às máquinas agrícolas como pneus estreitos, elevada pressão de inflação e alta carga por eixo têm causado o aumento da compactação do solo. Este fenômeno se agrava quando o solo é trabalhado com uma quantidade de água elevado, inadequado para as atividades agrícolas.

O uso de pneus radiais com pressão baixa e calibrada adequadamente vem sendo sugerido como uma medida de redução da pressão de contato com o solo e, portanto, na redução da compactação do solo (LANÇAS e UPADHYAYA, 1997).

Para Tormena e Roloff (1996), na avaliação dos efeitos do tráfego de máquinas no solo, vários fatores devem ser levados em conta para que em cada situação particular possam ser analisados com segurança. As características iniciais do solo em função de sua condição estrutural são determinantes nas futuras modificações da compactação do solo. Assim, o conhecimento do histórico da área, se possível desde sua implantação, torna-se um pré-requisito fundamental no planejamento das ações de seu uso e manejo.

## **4.2 Avaliações mecânicas**

#### 4.2.1 Compressibilidade do solo

No sistema de plantio direto o revolvimento do solo é restrito à linha de semeadura e, no entanto, o tráfego ocorre normalmente em toda extensão da área, resultando num aumento da compactação do solo, principalmente em superfície (ASSIS, 2002).

Os solos agrícolas têm sofrido grande alteração na sua estrutura devida à compressão causada pelo tráfego de máquinas pesadas, muitas vezes com cargas superiores às que podem ser suportadas, principalmente quando se encontram com umidades acima do seu limite de plasticidade, sendo um fator determinante na variação da produtividade agrícola (CARDOSO, 2007).

A pressão de contato pneu-solo e o número de passadas de rodados são os principais fatores causadores da compactação na camada arável do solo (0-50 cm), podendo ser minimizada por meio da utilização de baixa pressão de inflação dos pneus. Atualmente, cargas no eixo acima de 100 kN, somente são aceitáveis se usadas baixas pressões nos pneus. Uma carreta agrícola com peso de 300 kN, pressão de contato pneu-solo de 100 kPa, pneus largos com baixa pressão de inflação e/ou por montagem de rodas em eixos duplos ou triplos não causam compactação excessiva na camada superficial (TIJINK et al., 1995).

O processo de compressão descreve a compactação (expulsão do ar) e a consolidação (expulsão da água) do solo e o entendimento do processo de compressão é essencial para estimar as alterações que podem ocorrer na estrutura do solo, quando submetido à determinada pressão externa. A curva de compressão uniaxial tem sido amplamente utilizada para estudar o processo de compressão do solo. A partir dessa curva, é obtido um indicador que expressa a máxima pressão que pode ser aplicada ao solo antes da ocorrência de um incremento na compactação (GUPTA e ALLMARAS, 1987).

Os efeitos do tráfego e do tipo de preparo sobre a estrutura dos solos agrícolas, quando da adoção do sistema plantio direto na região dos Cerrados, têm sido pouco pesquisados. Os estudos desenvolvidos são apenas qualitativos e utilizam-se, geralmente, de propriedades, tais como: a densidade do solo e a resistência do solo à penetração, as quais não possibilitam prever quanto de pressão o solo pode receber de forma que, em manejos futuros, a compactação possa ser evitada (SILVA et al., 2003).

Um solo pode apresentar vários estados de Consistência, conforme o seu teor de água, sendo na condição de solo friável (abaixo do limite plástico) que se recomenda a realização das operações moto-mecanizadas, em função da mínima coesão entre as partículas do solo e da menor adesão do solo às ferramentas de preparo e semeadura (ASHBURNER e SIMIS, 1984).

A determinação da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) poderá ser realizada a partir dos ensaios de compressibilidade uniaxial, que consistem, basicamente, em aplicar sucessiva e continuamente pressões crescentes e preestabelecidas em um corpo de prova (solo contido nos anéis), através de um consolidômetro, como o desenvolvido por Silva e Cardoso (2005).

Dias Junior e Pierce (1996), comentaram que a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) tem sido usada como uma estimativa da capacidade de suporte de carga dos solos agrícolas. Casagrande (1936), afirmaram que a pressão de pré-consolidação representa a maior pressão a que o solo foi submetido no passado (Figura 1). Assim sendo, o entendimento do comportamento compressivo do solo, utilizando as curvas de compressão, adquire uma grande importância em razão de serem a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo e tráfego de máquinas mais adequados, reduzindo os efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação do solo (ASSIS e LANÇAS, 2005).

A obtenção da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) se dá a partir de um método denominado ensaio de consolidação, cuja definição consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada à amostra de solo até que todos os vazios deste sejam comprimidos. O ensaio de consolidação preconiza a utilização de um consolidômetro (SILVA et al., 2007).

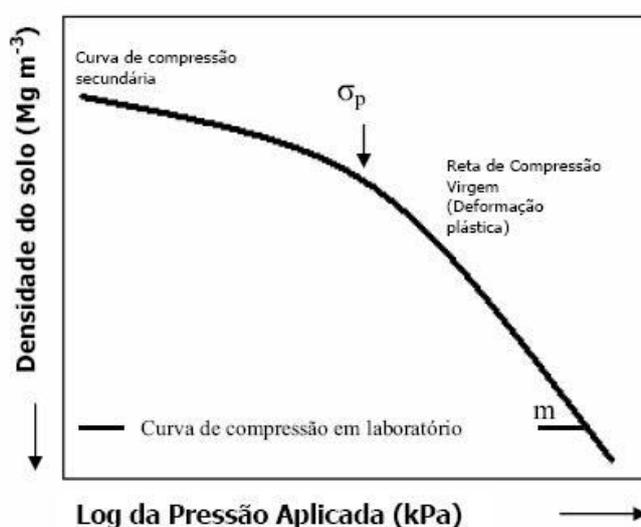


Figura 1 - Curva de compressão do solo mostrando a curva de compressão secundária, reta de compressão virgem com suas regiões de deformações elásticas e plásticas, respectivamente, a posição da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), e o índice de compressão ( $m$ ) (DIAS JUNIOR, 1994).

Para Veenhof e McBride (1996), a pressão de pré-consolidação é considerada uma estimativa da história do estresse ao qual o solo foi submetido e de sua capacidade de suporte de carga.

Dias Junior (1994), sugere a utilização de modelos de compressibilidade, com base na pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), para os estudos de capacidade de suporte de carga, que predizem a máxima pressão que um solo pode suportar em diferentes umidades, sem causar compactação adicional, fornecendo, portanto, informações para a prevenção da compactação. A  $\alpha_p$  pode ser obtida por meio da curva de compressão do solo, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo. Isso pode ser feito utilizando vários métodos, sendo os mais comuns o método gráfico de Casagrande (1936) e o proposto por Dias Junior e Pierce (1995).

Para Vargas (1977), a compressibilidade é a propriedade que certos materiais têm de mudarem de forma ou volume quando sujeitos a forças externas.

Os parâmetros de compressibilidade são influenciados pelo conteúdo de água do solo, verificando-se que, à medida que aumentava a umidade do solo, diminuía os valores da pressão de pré-compactação e aumentava o índice de compressão do solo,

indicando menor capacidade de suporte de carga e maior compressibilidade do solo, respectivamente (SILVA e CABEDA, 2006).

Soane (1990) considerou que o solo é um material compressivo que reage na forma de compactação, quando um determinado esforço a ele é aplicado.

A avaliação da compressibilidade do solo e da sua capacidade de suporte de carga, sob diferentes condições de umidade e sob diversos sistemas de manejo, é de grande importância não só para determinar as pressões máximas que o solo pode suportar nessas condições, mas também para minimizar os riscos à compactação em solos cultivados (SILVA e CABEDA, 2006).

Barata (1984) sugere que a compressibilidade depende de propriedades físicas-mecânicas do solo, tais como a textura, resistência individual dos grãos, densidade, estrutura, grau de saturação, permeabilidade e tempo de ação da carga.

Para Larson et al. (1980), a curva de compressão do solo é determinada pela pressão de pré-compactação, que é a capacidade máxima do solo de suportar carga e o índice de compressão, que é um indicador da susceptibilidade do solo à compactação, pois representa a redução da porosidade em relação ao aumento da pressão aplicada. Quanto maior o índice de compressão, mais compressível o solo.

Dias Junior (1994) mostrou que o histórico de tensão e, principalmente, a variação do teor de água, afeta o comportamento compressivo do solo. O autor desenvolveu um modelo que descreve uma relação exponencial entre a pressão de pré-consolidação e o teor de água. Este modelo é da forma:  $\sigma_p = 10^{(a + b U)}$ , onde  $\sigma_p$  é a pressão e pré-consolidação; a e b são parâmetros ajustados e U é a umidade gravimétrica que permite determinar a máxima pressão que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional para determinados valores de umidade.

#### **4.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração**

A resistência do solo à penetração é um indicativo intermediário da compactação não sendo uma medição física direta das condições do solo, uma vez que seu

valor é variável em função de outros fatores, principalmente de teor de água e do tipo de solo. (LANÇAS, 1996).

Para Lanças (1996) definiu a compactação do solo como sendo o resultado do rearranjo das suas partículas que foram submetidas a forças externas, originado aumento na sua densidade pela diminuição do seu volume para uma massa de partículas constante.

Busscher et al. (2002) constataram que o efeito da subsolagem é temporário, uma vez que a reconsolidação do solo aumenta com o volume acumulativo de precipitações pluviométricas.

Segundo Stone et al. (2002), a compactação é uma alteração estrutural que promove reorganização das partículas e de seus agregados, podendo limitar a adsorção e absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas, resultando em decréscimo da produtividade das culturas e aumento da energia necessária para o preparo do solo.

Além do teor de água, a textura do solo influi diretamente na resistência do solo à penetração e a utilidade de suas medidas somente podem ser consideradas na comparação de solos do mesmo tipo e com mesmo teor de água (MANTOVANI, 1987).

Para Figueiredo et al. (2000), a compactação é uma conseqüência direta do manejo inadequado e a umidade é o fator que controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo.

A resistência do solo também pode limitar a produção vegetal, o que ocorre quando a diminuição do crescimento das raízes é de tal magnitude que o provisãoamento em água do cultivo se reduz em relação ao nível ótimo (CARDOSO, 2007).

Um dos atributos físicos mais adotados como indicativo da compactação do solo tem sido a resistência do solo à penetração, por apresentar relações diretas com o crescimento das plantas e por ser mais rápido e menos oneroso na identificação da compactação comparada à densidade do solo (STONE et al., 2002).

Para Silva (2002), qualquer alteração significativa na estrutura dos solos afeta a disponibilidade de água, difusão de  $O_2$  e a resistência do solo à penetração. Uma condição estrutural do solo ideal deveria possibilitar uma grande área de contato raiz-solo,

suficiente espaço poroso para o movimento de água e gases e níveis não impeditivos de resistência do solo à penetração das raízes.

Stone et al. (2002), esta compactação do solo ocorre quando este é submetido a determinada pressão, ocasionando redução de volume com conseqüente aumento da resistência à penetração e da densidade.

A resistência mecânica do solo à penetração é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e à intensidade de tráfego das máquinas agrícolas e é dependente do teor de água do solo (MIRANDA, 2006).

Na superfície e até a profundidade de 12 cm, o solo sofre os maiores efeitos do tráfego de máquinas, da atividade biológica e de ciclos de umedecimento e secagem que provocam grande variabilidade e dispersão dos valores de resistência mecânica do solo à penetração (SILVA et al., 2004).

A utilização crescente deste método deve-se a sua rapidez e facilidade de amostragem, que permite a análise de grandes áreas, e pela alta correlação encontrada entre a resistência à penetração do solo e o crescimento das raízes (ASSIS, 2002).

O estado de compactação dos solos agrícolas, apesar de ser fortemente influenciado pelo teor de água do solo, pode ser associado, de forma simplificada, a um índice de resistência à penetração de um cone padronizado, denominado índice de cone, obtido por um penetrômetro de cone (ASAE S313.2, 1997).

Para Hankansson e Voorhees (1997), a presença de compactação na camada arável é determinada principalmente pela pressão de contato pneu-solo. Enquanto na subsuperfície é determinada pela propagação das tensões aplicadas na superfície do solo. Em vista disso, a principal medida para minimizar a compactação do subsolo seria limitar a carga no eixo e/ou restringir as operações de campo para que sejam realizadas somente em períodos secos, pois é fundamental evitar, sempre que possível, o tráfego em condições do teor de água excessivo do solo.

Segundo Torres e Saraiva (1999), as determinações da resistência do solo à penetração, em razão da grande influência do teor de água, considera-se que é um pouco temerário utilizar somente as avaliações feitas com penetrômetro e, em termos absolutos, definir se um solo está ou não compactado. É importante que os resultados obtidos sejam inseridos em um contexto maior de avaliação da compactação, contemplando além do uso

correto do equipamento (numa mesma condição de teor de água, dentro da faixa de friabilidade do solo) o histórico de produtividade da propriedade em diferentes glebas e abertura de trincheiras para a verificação do sistema radicular.

### **4.3 Avaliações físicas do solo**

Para Dias Junior (1994), a quantidade de água é um fator que determina a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo. Em condição de solo seco, sua capacidade de suporte de carga é elevada, podendo ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa; entretanto, em condições de elevada umidade, o solo fica susceptível à compactação por causa de sua baixa capacidade de suporte de carga.

Outra variável a ser considerada no processo de compactação é a textura do solo. Poros maiores geralmente são ocupados por ar, e poros menores por água. Os solos cuja constituição apresenta partículas do mesmo tamanho são menos susceptíveis ao processo de compactação, comparados aos solos onde há mistura uniforme de argila, silte e areia. Isto se deve ao fato de que as partículas de tamanho diferentes se arranjam e preenchem os poros, quando submetidos a uma pressão no solo (ENCIDE, 2005).

Para Cardoso (2007), baseando-se no comportamento dos solos finos (silte e argila) na presença de água, observou-se que, quando muito úmido, as partículas ficaram em suspensão na água e se comportam como um líquido.

Quando perde parte de sua água, as partículas passam a deslizar umas sobre as outras e a água funciona como um lubrificante e o solo tornam-se plástico; e, quando mais seco, os grãos se aglutinam entre si, formando torrões e tornam-se quebradiços, definindo, assim, limites de umidade que modificam o comportamento do solo (CARDOSO, 2007).

As umidades correspondentes à mudança de estado de consistência do solo são definidas como: limite de contração (LC), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) (ATTERBERG, 1911).

Portanto, a umidade do solo é a grande responsável pela deformação do solo quando os demais atributos permanecem constantes, pois quanto menor o teor de água

do solo maior será sua capacidade de suporte de carga e menor a possibilidade de compactação, dentro de certos limites (CARDOSO, 2007).

Silva (2002), afirma que, a partir dos limites de liquidez, contração, plasticidade identificam-se os estados ou regiões de consistência importantes para o tráfego agrícola ou preparo do solo. Que são: região de friabilidade (RF), que representa a faixa de umidade entre o limite de contração e o limite de plasticidade, e a região de plasticidade (RP), que representa a faixa de umidade entre o limite plástico e o limite de liquidez.

A redução da porosidade dificulta a infiltração de água, aumentando o escoamento superficial e as perdas de água e de terra, levando ao empobrecimento da fertilidade da camada arável. Assim, o crescimento superficial das raízes em solo compactado, ou seja, a raiz confinada nos primeiros centímetros do perfil, dificulta o abastecimento hídrico e nutricional das plantas (MORAES et al., 1995; STEINHARDT, 1983), ocasionando perda de produtividade (ALVARENGA et al., 1997).

#### **4.4 Avaliações hídricas do solo**

Para Reichert et al. (2003), a qualidade do solo está associada aquele solo que: a) permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície; b) responde ao manejo e resiste à degradação; c) permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; e d) possibilita o crescimento das raízes.

Um solo com boa qualidade física deve apresentar duas características principais: a) deve ser estável, ou seja, as partículas de argila devem estar floculadas e não dispersas; b) o solo deve ter uma adequada distribuição de tamanho de poros e uma elevada porosidade total que fará com que o solo seja capaz de absorver, armazenar e liberar água para as plantas utilizarem em resposta à demanda de transpiração (GATE et al., 2006).

Soane e Van Ouwerkerk, (1994), a degradação da qualidade do solo pode afetar vários fatores ambientais. Em relação à atmosfera, a compactação influenciando na aeração e permeabilidade do solo e desenvolvimento das culturas pode alterar o fluxo de gases do solo para a atmosfera e vice versa. A compactação pode resultar em redução da taxa de infiltração e aumento do escoamento superficial, contribuindo para poluição da água superficial. Onde a concentração de nitrato excede a capacidade com que a planta pode

absorver, como pode ocorrer em solos compactados que limitam o crescimento radicular, o excesso pode lixiviar para águas subsuperficiais ou ser perdido por desnitrificação. Em termos de recursos do solo, a compactação pode alterar todos os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo.

A porosidade do solo é um atributo físico que sofre grandes alterações com a compactação. Trabalhos realizados indicam relação significativa da compactação com o decréscimo da porosidade, da continuidade do número de poros e da difusão de gases, e com reduções significativas principalmente no volume dos macroporos (NOVAK et al., 1992; HILLEL, 1998).

Os poros do solo apresentam-se de tamanhos e formas variadas, e a sua função está relacionada com o seu tamanho. Entre as partículas de maior tamanho, como areia ou entre agregados, predominam os poros maiores chamados macroporos e entre as partículas menores, como as argilas, predominam poros menores chamados microporos (VIEIRA et al., 1998).

#### **4.5 Avaliações químicas do solo**

Uma vez que a adsorção de fósforo em solos oxidados altera o balanço de cargas, afetando a floculação e dispersão de partículas, esta pode também aumentar a suscetibilidade do solo à compactação por facilitar o preenchimento do espaço poroso com as partículas dispersas. Com isso, além da umidade, textura, estrutura, história de tensão e densidade do solo, como proposto pelos pesquisadores (Dias Junior, 1994; Dias Junior e Pierce, 1995; Dias Junior e Pierce, 1996), a adsorção de P pode afetar a compressibilidade do solo (SILVA et al., 1999).

Maiores teores de matéria orgânica condicionam o solo a ter maior retenção de água e, por conseguinte, favorecem a compressibilidade. Por outro lado, a camada subsuperficial com baixos teores de matéria orgânica, maiores teores de argila e menor contribuição de óxidos favorecem uma estrutura em blocos mais compacta, possibilitando maior resistência às forças compressivas. (SILVA et al., 1999).

Além do efeito físico, de facilitar o crescimento radicular em profundidade, os bioporos apresentam microclima favorável ao crescimento das raízes, à medida em que há maior teor de matéria orgânica (SANTOS e CAMARGO, 1999).

É interessante notar que, embora no complexo sortivo ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ), haja concentração de cátions e ânions nas camadas superficiais, na solução do solo a concentração de sais solúveis ocorre em camadas intermediárias do perfil (NUNES et al., 2008).

#### **4.6 Variabilidade espacial de dados amostrais do solo**

A geoestatística difere da estatística clássica na forma de avaliar a variação dos dados. A estatística clássica supõe que as realizações das variáveis aleatórias são independentes entre si, ou seja, não há relação entre a variação e a distância entre os pontos de amostragem, a geoestatística considera existir uma dependência da variação com o espaço de amostragem (LANDIM e STURADO, 2002).

A malha de amostragem pode ser do tipo: aleatória quando a distribuição dos pontos de coleta é casual; agregada ou agrupada quando ocorrem grupos (*cluster*) de pontos mais próximos entre si; e regular quando os pontos estão regularmente espaçados (LANDIM e STURADO, 2002).

A variabilidade espacial vem sendo uma das preocupações de pesquisadores, praticamente desde o início do século. A estratégia utilizada para minimizar a descontinuidade e a variabilidade de experimentos, foi a adoção de técnicas de casualização e da repetição, e o melhor conhecimento das funções de distribuição, que levaram à adoção de amostragem ao acaso, desprezando assim, as coordenadas geográficas do ponto amostrado. Este procedimento somado a distribuição normal de freqüências usado para assumir independência entre as amostras, e assim garantir a validade do uso da média e o desvio padrão para representar o fenômeno. Por outro lado, a distribuição normal não garante a independência entre amostras, a qual pode ser verificada através da autocorrelação. A principal razão para isto é que o cálculo da freqüência de distribuição não leva em conta as distâncias nas quais as amostras foram coletadas no campo (FREITAS, 2000).

A variabilidade espacial das variáveis pode ser estudada por meio das ferramentas da geoestatística, que se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas, segundo a qual os valores de uma variável estão, de alguma maneira, relacionados à sua disposição espacial e, portanto, as observações tomadas a curta distância se assemelham mais do que aquelas tomadas a distâncias maiores (VIEIRA et al., 1981; VAUCLIN et al., 1983).

Para o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo tem se utilizado uma ferramenta de análise, conhecida como geoestatística (VIEIRA et al., 2000). A geoestatística vem sendo aplicada de forma crescente na avaliação da variabilidade espacial e permite a interpretação dos resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural, considerando a existência de dependência espacial dentro do espaço de amostragem (CARVALHO, 1991). Uma das aplicações da geoestatística é conhecer parâmetros que caracterizam a estrutura de dependência espacial e utilizá-los em técnicas geoestatísticas de interpolação, para fins de mapeamento da variação espacial das propriedades do solo.

A variabilidade espacial vem sendo uma das preocupações de pesquisadores, praticamente desde o início do século. A estratégia utilizada para minimizar a descontinuidade e a variabilidade de experimentos, foi a adoção de técnicas de casualização e da repetição, e o melhor conhecimento das funções de distribuição, que levaram à adoção de amostragem ao acaso, desprezando assim, as coordenadas geográficas do ponto amostrado. Este procedimento somado a distribuição normal de freqüências usado para assumir independência entre as amostras, e assim garantir a validade do uso da média e o desvio padrão para representar o fenômeno. Por outro lado, a distribuição normal não garante a independência entre amostras, a qual pode ser verificada através da autocorrelação. A principal razão para isto é que o cálculo da freqüência de distribuição não leva em conta as distâncias nas quais as amostras foram coletadas no campo (FREITAS, 2000).

Krige (1951) verificou em seus trabalhos com mineração que a variância dos dados possui uma estruturação que depende da distância de amostragem. A partir desta constatação, surgiu os conceitos básicos de geoestatística. Matheron (1963), baseado nas observações de Krige, desenvolveu a “Teoria das Variáveis Regionalizadas”, sendo está uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples.

Os variogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostram o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, a variação nas diferentes direções do terreno e mostrando também continuidade da característica estudada no terreno (LANDIM, 1998).

O uso do semivariograma e de um método de interpolação chamado krigagem, possibilitam a construção de mapas de contornos (isolinhas ou curvas de nível) com alta precisão, uma vez que após a interpolação, a densidade espacial de dados será muito maior do que antes, além de oferecer também os limites de confiança para o mapa, através da variância da estimativa. Além disso, conhecendo-se os semi-variogramas das variáveis em estudo, e os semi-variogramas cruzados correlacionadas, pode-se usar a krigagem ou a co-krigagem para delinear espaçamento e disposição de amostras no campo para se obter uma variância de estimativa prefixada (GUIMARÃES, 2004).

A variabilidade espacial das propriedades do solo tem sido uma área de aplicação da geoestatística, como mostra os trabalhos de Vieira (1995), que verificou o efeito da distância na variabilidade das amostras de solo no campo. Em outro trabalho, Vieira (1997) estudou a variabilidade espacial de alguns atributos químicos e granulométricos do solo dentro de uma parcela experimental e mostrou o uso potencial de analisar os dados pela geoestatística. O autor salienta ainda que, o uso da estatística clássica continua tendo o seu espaço, potencialidades e limitações, não devendo ser abandonada. São justamente nos problemas onde a estatística clássica tem limitações, que a geoestatística tem suas maiores aplicações.

O grau de dependência espacial pode ser classificado em: forte, quando o variograma apresentar efeito pepita menor ou igual a 25 % do patamar; moderado, quando a relação estiver entre 25 e 75 %; fraco, quando o efeito pepita for superior a 75 % do patamar. Portanto, quanto menor a relação  $(C_0/C_0+C)$ , menos o efeito pepita está influenciando a dependência espacial dos dados. O grau de dependência espacial por meio do cálculo da relação entre o efeito pepita e o patamar  $(C_0/C_0+C)$  para cada modelo ajustado (CAMBARDELLA et al., 1994).

O efeito pepita, que é um parâmetro importante do semivariograma, reflete um erro analítico indicando uma variabilidade não explicada, que pode ser devido tanto a erros de medidas ou micro variação não detectado em função da distancia de amostragem

utilizada (CAMBARDELLA et al., 1994), sendo impossível quantificar a contribuição individual dos erros de medições ou da variabilidade (ARZENO, 1990).

O efeito pepita, que é uma característica do semivariograma que expressa a variabilidade não explicada pelas distâncias amostrais utilizadas (McBratney & Webster, 1986) e pode ser representada como porcentagem do patamar e tem por objetivo facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Trangmar et al., 1985). A análise da relação  $C_0$  (o ponto onde a curva corta o eixo y, eixo da semivariograma);  $C_1$  (o ponto onde a curva estabiliza;  $C_0/(C_0+C_1)$ , a profundidade de 0,20 a 0,30 m e a 0,30 a 0,40 m) apresentou forte dependência espacial ( $IDE \geq 75\%$ ), conforme os intervalos propostos por Zimback (2001).

O programa computacional GS+ realiza a escolha do melhor modelo do variograma teórico baseando-se na minimização da soma dos quadrados dos resíduos. Tendo como modelos de variogramas exponencial, esférico, gaussiano e linear.

A técnica da confecção dos mapas de isolinhas, onde são geradas estimativas de dados de pontos não amostrados a partir de pontos amostrados, denomina-se interpolação de dados (ZIMBACK, 2003).

## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Caracterizações da área experimental**

O presente estudo foi realizado na Fazenda Experimental Lageado da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus de Botucatu, no Estado de São Paulo.

O clima, segundo a classificação de Köppen (1948), é do tipo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico) com uma estação seca, que vai de abril a agosto e a estação chuvosa que compreende os meses de setembro a março, sendo o mês de janeiro o mais chuvoso (CUNHA et al., 1999).

Essa área vinha sendo cultivada há vários anos com a cultura do milho, utilizando-se ininterruptamente do sistema convencional de preparo do solo (aração com arado de disco e gradagem niveladora leve). As escarificações foram realizadas utilizando-se um escarificador de cinco hastes, espaçadas de 0,25 m, com profundidade de trabalho de 0,30 m. Essas áreas foram cultivadas na época de safra de verão ficando em pousio durante o restante do ano.

Foram selecionadas duas áreas, ambas conduzidas por sistema de plantio direto desde 2007, sendo que a Área 1, com 2,2 ha, foi escarificada a 0,30 m de profundidade em 2008. A Área 2 com 2,7 ha, permaneceu sem mobilização (Figura 2).

As áreas experimentais estão localizadas entre as coordenadas geográficas  $22^{\circ} 48' 10''$  a  $22^{\circ} 48' 30''$  Latitude Sul e  $48^{\circ} 25' 40''$  a  $48^{\circ} 25' 50''$  Longitude Oeste e altitude de 720 m (Figura 3). O solo dessas áreas corresponde à classificação Nitossolo Vermelho distroférico, textura argilosa de acordo com Carvalho et al. (1983), atualizado pela sistema de classificação de solos da EMBRAPA (2006).



Figura 2 - Área experimental de Plantio direto, com escarificação (a) e sem escarificação (b).

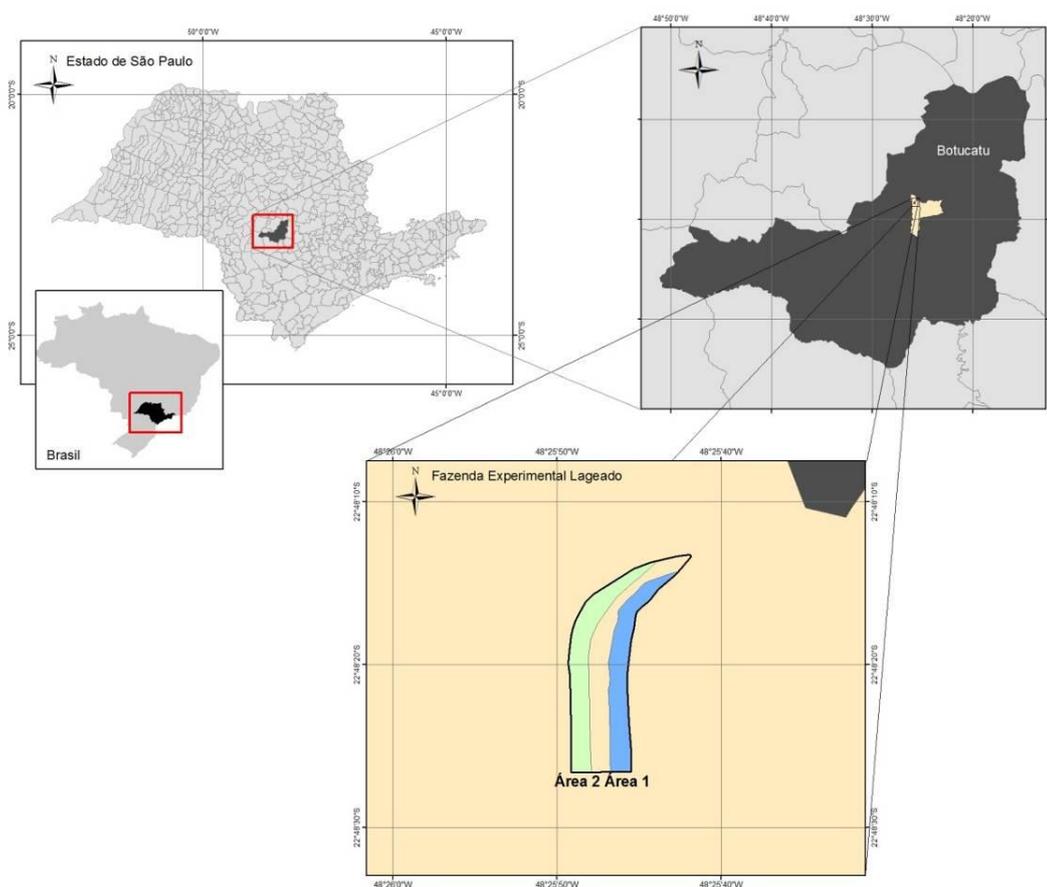


Figura 3. Mapa do Brasil com detalhe do Estado de São Paulo, localização do município de Botucatu/SP, da Fazenda Experimental Lageado e a área de estudo.

As avaliações para a porosidade foram realizadas no início de fevereiro, a resistência a penetração do solo e as coletas dos anéis aconteceram durante o mês de março, todas no ano de 2010.

## 5.2 Capacidade de suporte de carga do solo (CSCS)

As densidades do solo foram avaliadas nas mesmas profundidades que a CSCS, através de planilhas de cálculo da pressão de preconsolidação conforme recomendado por Silva et AL. (2007). Para realização dos ensaios de compressibilidade, objetivando a estimativa da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), corpos-de-prova (monólitos) de diâmetro aproximado de 69,5 x 25 mm de altura foram amostrados para cada profundidade e camada avaliada. Os monólitos foram coletados com o auxílio de um Amostrador Hidráulico (Figura 5), montado na Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS), desenvolvido pelo NEMPA, Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agrícolas do Departamento de Engenharia Rural, da FCA/UNESP, Campus de Botucatu/SP, conforme Lanças e Santos Filho (1998). A UMAS pode ser transportada por rodovias, tracionada por carros e caminhonetes e no campo é tracionada por um trator e, como fonte de potência, o equipamento utiliza o sistema hidráulico do trator agrícola (Figura 4).



Figura 4. Unidade Móvel de Amostragem do solo (UMAS).

O trator utilizado foi de 130 cv com e 2200 rpm de potência no motor.

Dos três anéis que são utilizados na amostragem de CSCS e densidade do solo: o primeiro (superior) e o último (inferior) foram utilizados para amostras deformadas, e o segundo anel (do meio) foi considerado uma amostra indeformada, sendo utilizado para a realização dos ensaios de compressibilidade no laboratório, para a densidade, macro e micro poros. As amostras foram devidamente preparadas, plastificadas e parafinadas para manter a forma e consistência no anel conforme veio do campo no decorrer dos ensaios, para serem saturados por capilaridade com água destilada no laboratório. Após 48 horas, as amostras foram equilibradas naturalmente à temperatura ambiente em cinco (5) teores de água.



Figura 5. Coleta de anéis para compressibilidade com a UMAS.

As condições dos teores de água consideradas para realização do ensaio de compressibilidade foram obtidas das amostras das 4 profundidades avaliadas, sendo feita uma amostra homogênea e média, saturada, seca, tenaz e na região de friabilidade do solo. Estas faixas de teor de água foram definidas tendo como referência os limites de consistência do solo (limite de liquidez – LL - 46 %, limite de plasticidade – LP - 33 % e limite de contração – LC - 10 %).

Os ensaios de compressão uniaxial (compressibilidade) foram realizados nas amostras submetidas aos seguintes teores de água: 0,10; 0,19; 0,28; 0,37 e 0,46  $\text{kg kg}^{-1}$ . As pressões aplicadas em cada amostra seguiram a metodologia proposta por Dias Junior (1994), que preconiza a aplicação dos seguintes níveis de pressão: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa (Figura 6), até que 90% da deformação máxima na amostra seja obtida (TAYLOR et al., 1979).

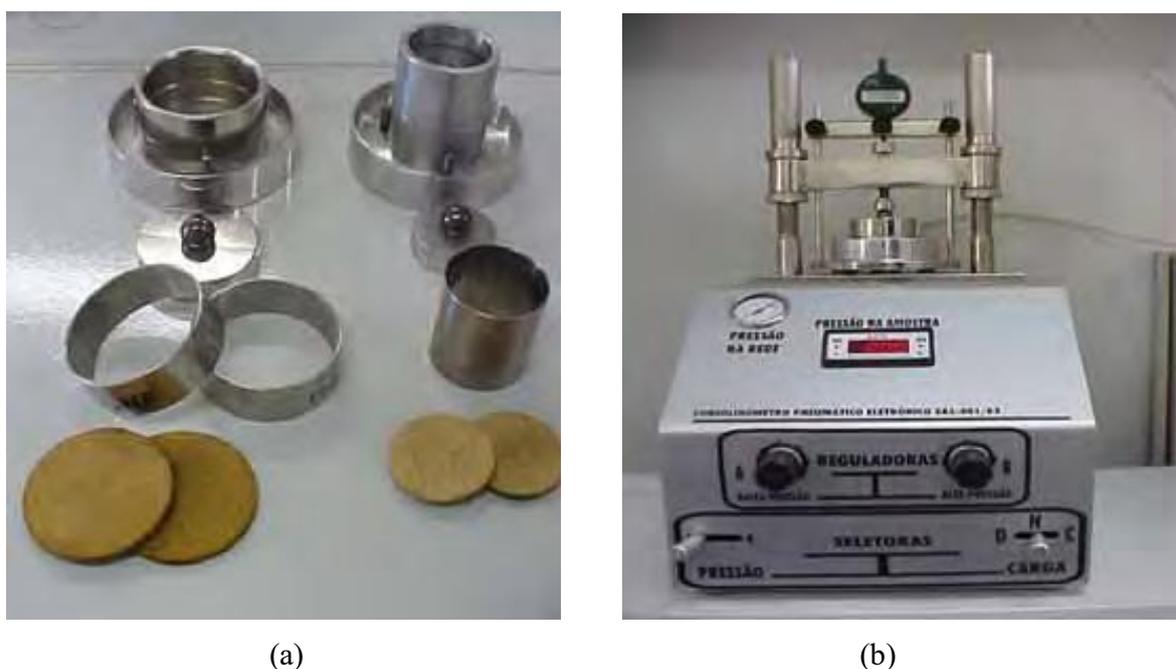


Figura 6. Equipamentos laboratoriais para realização dos ensaios de compressibilidade: suporte do anel, anel e placa porosa (a). Consolidômetro (b) desenvolvido por Silva et al. (2007).

Dos ensaios de compressibilidade foram obtidas as curvas de compressão do solo, das quais se estimaram a pressões de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), de acordo com a sugestão de Dias Junior e Pierce (1995).

### 5.3 Resistência do solo à penetração

A amostragem de solo das áreas para o levantamento da resistência do solo à penetração (RP) foi realizada com um penetrômetro hidráulico-eletrônico (Figura 7), desenvolvido pelo NEMPA.

O penetrômetro fazia parte da UMAS e constituiu-se de um cilindro hidráulico, uma haste com cone sólido na ponta, a qual obedeceu as características estruturais e operacionais definidas pela norma ASAE S313.2 (1997). A haste é conectada a uma célula de carga com capacidade de 2.000 kg e a um sensor de profundidade do tipo potenciométrico linear, ambos ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados composto por um Microllogger CR23X, da Campbell Cientific.

A grade amostral do índice de cone (IC) foi de 15 por 25 m, com bordadura de 3 m, amostrando 50 pontos em cada área nas profundidades de 0 até 0,40 m.



Figura 7. Penetrômetro hidráulico-eletrônico instalado na UMAS – Unidade Móvel de Amostragem do Solo.

### 5.4 Atributos físicos do solo

#### 5.4.1 Teor de água do solo

O teor de água do solo foi determinado pelo método gravimétrico, que consiste na pesagem anterior e posterior à secagem em estufa a 105°C por 24 horas (EMBRAPA, 1997).

$$U = \left( \left[ \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \right] \times 100 \right) \quad (1)$$

Onde:

U = umidade gravimétrica (% ou kg kg<sup>-1</sup>);

M<sub>su</sub> = massa de solo com água (kg);

M<sub>ss</sub> = massa de solo seco a 105-110 °C (kg).

#### 5.4.2 Densidade de solo (D<sub>s</sub>)

A densidade do solo inicial (D<sub>si</sub>), na condição em que se encontrava o solo no momento da amostragem (histórico do manejo do solo), foi determinada através do método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

$$D_s = \left( \frac{M_s}{V_s} \right) \quad (2)$$

Onde:

D<sub>s</sub> = densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>);

M<sub>s</sub> = massa do solo seco (g);

V<sub>s</sub> = volume total do solo (cm<sup>3</sup>).

#### 5.4.3 Densidade de partícula (D<sub>p</sub>)

A densidade de partícula (D<sub>p</sub>) foi determinada pelo método do balão volumétrico, com álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

#### 5.4.4 Textura do solo e argila dispersa em H<sub>2</sub>O

A determinação da textura pelo método do densímetro de Boyoucos e do teor de argila dispersa em água (ADA) seguiu o método da EMBRAPA (1997).

#### 5.4.5 Índice de flocculação

É a percentagem de argila dispersa em água, em relação a argila total, seguindo o método da EMBRAPA (1997).

O índice de flocculação (IF) foi calculado com bases nas expressões:

$$IF_1 = \left( \frac{AT - ADA}{AT} \right) 100 \quad (3)$$

Onde:

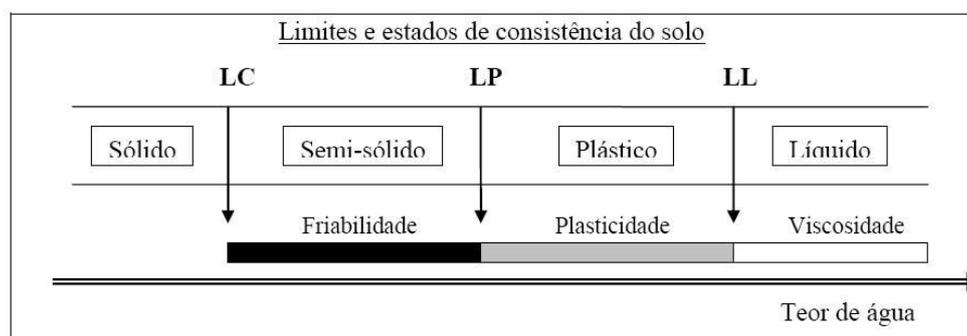
$IF_1$ : índice de flocculação, empregando-se ADA ( $g\ kg^{-1}$ )

$AT$ : argila total, ( $g\ kg^{-1}$ )

$ADA$ : argila dispersa em água ( $g\ kg^{-1}$ )

#### 5.4.6 Limites de consistência

Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) foram determinados conforme o método de Sowers (1965) e o limite de contração (LC) foi determinado de acordo com Bowles (1986). Os limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC) estão mostrados na Figura 8.



Fonte: Limites de Consistência de Attemberg (1911) adaptado por Silva (2002).

Figura 8. Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC).

#### 5.4.7 Macro e microporosidade do solo e volume total de Poros (VTP).

Para determinar a macroporosidade (Mp), a microporosidade (mp) e a porosidade total do solo (VTPt), foram utilizados os métodos descritos pela EMBRAPA (1997).

As amostras não deformadas foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis. Para evitar perda de solo, foi colocado um tecido de poliéster, que permite apenas a passagem de água, no fundo de cada anel e fixado com atilho de borracha. Após 72 horas de imersão das amostras e com todos os poros do solo ocupados pela água, iniciou-se a drenagem das amostras.

A água retida nas amostras, depois de atingido o equilíbrio, correspondeu à microporosidade, que foi determinada pela equação:

$$M = \frac{(a - b)}{c} \quad (4)$$

Onde:

M = microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

a = peso da amostra após ser submetida a uma sucção de 60 cm de coluna de água (g)

b = peso da amostra seca a 105-110° C (g)

c = volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ )

A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total (PT) e a microporosidade.

#### 5.4.8 Porosidade total do solo

A porosidade total (PT) foi determinado com base na expressão de Danielson e Sutherland (1986):

$$PT = \left[ 1 - \left( \frac{Ds}{Dp} \right) \right] \quad (5)$$

Onde:

PT = Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )

Ds = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

Dp = densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

## **5.5 Atributos químicos do solo**

### **5.5.1 Complexo sortivo**

A determinação do complexo sortivo ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{H}^+\text{Al}^{+++}$ ) foi realizada conforme Camargo et al., (1986), utilizando 8 amostras, sendo uma para cada manejo e cada profundidade.

### **5.5.2 Matéria Orgânica (MO)**

A MO foi determinada pelo método de Walkley e Black, adaptado e descrito por Raij et al., (2001).

## **5.6 Análise geoestatística e estatística dos dados amostrados**

A análise da dependência espacial para o índice de cone (IC) foi avaliada por meio da geoestatística, conforme Vieira et al. (1983). Para analisar o grau da dependência espacial desse atributo em estudo, utilizando a classificação de Cambardella et al. (1994), em que foram considerados de dependência espacial forte, os semivariogramas que apresentaram um efeito pepita menor ou igual a 0,25 do patamar (valor constante da variância dos dados separados por uma distância), moderada quando esteve entre 0,25 e 0,75 e fraca quando foi maior que 0,75. O ajuste dos semivariogramas foi realizado pelo programa computacional GS<sup>+</sup>.

Com o ajuste dos variogramas teóricos foi possível definir os processos de interpolação dos dados para a confecção dos mapas. Para a confecção dos mapas foi utilizado o programa computacional Surfer 8.0.

Todas as análises foram feitas por meio do programa computacional Sistema para Análise de Variância - SISVAR (FERREIRA, 2000). As médias das variáveis envolvidas no trabalho foram comparadas conforme Scott e Knott (1974) a 5 %.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Análise química do solo

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise química do Nitossolo Vermelho distroférico. O complexo sortivo e a matéria orgânica (MO), para caracterização da área, foram obtidos nas quatro profundidades avaliadas.

Tabela 1. Análises químicas do Nitossolo Vermelho distroférico nos diferentes sistemas de manejo e profundidades no sistema plantio direto. Laboratório de Fertilidade do Solo da FCA/UNESP, Botucatu, 2010.

Sistema	AMOSTRA(S) Profundidade (m)	pH CaCl <sub>2</sub>	M.O. g/dm <sup>3</sup>	P <sub>resina</sub> mg/dm <sup>3</sup>	H+Al -----	K	Ca	Mg	SB	CTC	Na <sup>+</sup> mmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>	V%
						mmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup>						
*PDCE	0-0,10	5,1	39	27	41	4,5	54	19	77	118	0,35	65
PDCE	0,10-0,20	5,2	34	12	43	2,2	55	18	76	118	0,39	64
PDCE	0,20-0,30	5,1	29	9	42	1,3	47	17	65	107	0,35	61
PDCE	0,30-0,40	5,3	21	4	34	0,8	50	16	66	100	0,39	66
**PDSE	0 -0,10	4,9	37	57	50	4,4	54	19	77	127	0,46	61
PDSE	0,10-0,20	5,0	30	10	46	2,6	50	18	71	117	0,35	61
PDSE	0,20-0,30	5,1	27	7	41	1,3	48	18	67	108	0,41	62
PDSE	0,30-0,40	5,5	16	5	30	0,7	57	17	75	105	0,46	72

\*PDCE – Plantio direto com escarificação; \*\*PDSE - Plantio direto sem escarificação.

A MO é o parâmetro que mais se correlaciona com densidade de solo, pois solos ricos em MO tendem a apresentar valores reduzidos de densidade do solo (Libardi, (1999) e Kiehl, (1979). Os valores de MO característicos dos tratamentos PDCE e PDSE, apresentados na Tabela 1, confirmam essas tendências.

## 6.2 Análise física do solo

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise textural e densidade de partículas do Nitossolo Vermelho distroférico. Nas diferentes condições de manejo e nas 4 profundidades avaliadas.

Tabela 2. Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas para os diferentes sistemas de manejo e profundidades no sistema plantio direto.

Tratamento	Profundidade	Argila	Silte	Areia	Densidade de
					Partículas
	M	-----	g kg <sup>-1</sup>	-----	Mg m <sup>-3</sup>
PDSE	0-0,10	558	283	159	2,92
PDSE	0,10-0,20	575	260	165	2,91
PDSE	0,20-0,30	610	174	148	2,92
PDSE	0,30-0,40	682	206	111	2,93
PDCE	0-0,10	505	315	179	2,94
PDCE	0,10-0,20	442	299	168	2,94
PDCE	0,20-0,30	560	293	146	2,96
PDCE	0,30-0,40	627	261	112	2,94

\*PDCE – Plantio direto com escarificação; \*\*PDSE - Plantio direto sem escarificação.

Prado e Centurion (2001) estudando a influência do preparo convencional utilizando grade pesada no preparo primário, e grade leve no preparo secundário; sobre a argila dispersa em água no cultivo intenso da cana-de-açúcar constataram não haver diferença entre as três camadas de solo, tal fato é justificado pelos autores em função da mobilização do solo (0-0,30 m).

Os valores da argila total (AT), argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF) estão apresentados na Tabela 3 para as camadas e tipo de manejo avaliado. Observa-se que a maior variação foi observada na AT, tanto em PDCE quanto em PDSE, sendo este atributo responsável pelas maiores alterações em IF.

Tabela 3. A argila total (AT), argila dispersa em água (ADA) e o índice de floculação (IF) do Nitossolo Vermelho em porcentagem.

Camadas (m)	PDCE			PDSE		
	AT	ADA	IF	AT	ADA	IF
<b>0-0,10</b>	55,83	40,14	28,11 C a	50,50	40,16	20,47 C b
<b>0,10-0,20</b>	57,50	40,15	30,18 C a	44,27	40,15	24,97 B b
<b>0,20-0,30</b>	61,00	40,14	34,19 B a	56,03	40,14	30,76 A a
<b>0,30-0,40</b>	68,20	40,16	41,12 A a	62,73	40,16	33,58 A b

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido das colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Os valores de IF evidenciaram uma maior agregação nas camadas mais profundas, onde também se encontram os maiores valores de argila. De acordo com a Tabela 3 houve diferença significativa para os valores de IF no PDCE, especialmente nas duas últimas camadas, diferenciando do PDSE, o mesmo comportamento foi verificado nas camadas superficiais. Tal comportamento pode ser justificado pela mobilização do solo com o escarificador ter ocorrido justamente até a profundidade de 0,3 m. Entre as profundidades só não houve diferença estatística na camada de 0,2 a 0,3 m. Os valores de IF no PDCE tiveram um valor maior em relação ao PDSE devido a desagregação que o solo sofreu pelo escarificador.

Para Reichert et al. (2009), valores de densidade do solo superiores a  $1,74 \text{ Mg m}^{-3}$  são considerados críticos.

Segundo Mentges et al. (2010), a intensidade de tráfego tem efeitos negativos sobre as propriedades físico-hídricas do solo, com elevação dos valores de densidade e resistência a penetração.

Os valores de densidade do solo (Ds) são apresentados na Tabela 4. Verifica-se que, na camada superficial os valores de Ds foram menores, quando comparados com os valores das demais profundidades para o sistema PDCE, que foram aumentando em relação ao aumento da profundidade. No PDSE aconteceu o inverso, na camada superficial ocorreram valores de densidade maiores do que nas camadas inferiores, onde os valores de densidade diminuíram.

Tabela 4. Densidade do solo em ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) de um Nitossolo Vermelho em relação ao manejo em relação a profundidade.

#### Tratamentos

<b>Camadas (m)</b>	<b>PDCE</b>	<b>PDSE</b>
<b>0-0,10</b>	1,31 A a	1,40 A b
<b>0,10-0,20</b>	1,35 A a	1,43 A a
<b>0,20-0,30</b>	1,37 A a	1,36 A a
<b>0,30-0,40</b>	1,43 A a	1,37 A a

**CV = 5,14; DP = 0,03**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido das colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Lima et al. (2004) encontrou valores médios de densidade do solo de 1,60 a 1,75 Mg m<sup>-3</sup> com sp de 250 a 290 kPa em cada ciclo sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e de 1,57 a 1,62 Mg m<sup>-3</sup> com sp 230 a 240 para o sistema de manejo não irrigado.

Neste trabalho a camada que apresentou diferença estatística foi a de 0,0 a 0,10 m entre os manejos. Nesta profundidade, no sistema PDCE, pode ter ocorrido uma concentração de matéria orgânica maior que nas outras camadas, provavelmente devido à palha da cultura anterior (milho) que ficou em decomposição sobre a superfície do solo, onde a mobilização do solo distribui a MO entre as camadas pela ação dos órgãos ativos do equipamento.

Os resultados obtidos para a porosidade total do solo mostraram que não houve diferença estatisticamente significativa tanto entre os manejos como entre as profundidades estudadas (Tabela 5).

Tabela 5. Porosidade total de um Nitossolo Vermelho em função do manejo e em profundidade.

<b>Camadas (m)</b>	<b>Tratamentos</b>	
	<b>PDCE</b>	<b>PDSE</b>
<b>0-0,10</b>	53,43 A a	57,03 A a
<b>0,10-0,20</b>	56,24 A a	54,87 A a
<b>0,20-0,30</b>	58,56 A a	59,91 A a
<b>0,30-0,40</b>	53,92 A a	57,03 A a

**CV = 5,12; DP = 1,67**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido das colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Para Reinert et al. (2008), a ausência de valores elevados de densidade do solo, na camada superficial, ocorre em razão da maior densidade de raízes, maior teor de matéria orgânica, ciclos de umedecimento e secagem e do revolvimento parcial no momento da semeadura.

Os resultados de macroporos não diferiram estatisticamente entre os manejos e profundidades testados (Tabela 6).

Tabela 6. Macroporosidade de um Nitossolo Vermelho em relação ao manejo e em profundidades.

Camadas (m)	Tratamentos	
	PDCE	PDSE
0-0,10	13,43 A a	15,69 A a
0,10-0,20	14,24 A a	13,21 A a
0,20-0,30	18,23 A a	17,91 A a
0,30-0,40	14,26 A a	16,15 A a

**CV = 17,02; DP = 1,51**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido das colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Os valores de microporosidade obtidos não diferiram estatisticamente entre os manejos e também entre as profundidades (Tabela 7).

Tabela 7. Microporosidade de um Nitossolo Vermelho em função ao manejo e em profundidade.

Camadas (m)	Tratamentos	
	PDCE	PDSE
0-0,10	40,00 A a	41,33 A a
0,10-0,20	42,00 A a	41,67 A a
0,20-0,30	40,33 A a	42,00 A a
0,30-0,40	39,67 A a	41,67 A a

**CV = 4,92; DP = 1,16**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido das colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Os resultados obtidos nas Tabelas 6 e 7 não confirmaram a proporção ideal da distribuição de poros por tamanho de 2:1 (micro/macroporo), relatada por Kiehl (1979), garantindo suficiente aeração, permeabilidade e capacidade de retenção de água pelo solo.

Camara e Klein (2005), avaliando a escarificação em plantio direto, observaram que tanto a porosidade total como a macroporosidade não apresentaram diferença significativa entre os manejos.

Após as operações de preparo e a descompactação do solo acontecem modificações na distribuição de poros pelo tamanho (macro e micro), iniciando-se também no momento da semeadura no Plantio Direto, segundo Carvalho et al. (1999). Desta forma, o tipo de mobilização do solo, no PDCE e no PDSE, não foi suficiente para fornecerem diferenças nos valores da relação macro e micro poros para as diversas camadas estudadas.

Segundo Colet et al. (2009), avaliando até a profundidade de 0,30 m, em áreas com e sem escarificação, encontram diferença estatística para macroporosidade e porosidade total na camada de 0,0 a 0,10 m e 0,20 a 0,30 m, sendo que a micro porosidade não mostrou diferença entre os manejos.

Ralisch et al. (2001) concluíram que a escarificação tem efeitos somente para uma safra de cultura.

### **6.3. Resistência do solo à penetração**

O valor da umidade média do solo no momento da avaliação da resistência à penetração (RP) nos tratamentos analisados foi de  $0,23 \text{ kg kg}^{-1}$ , encontrando-se dentro da faixa de friabilidade do solo e entre os LP e LC.

Para Assis et al. (2009) os maiores valores de resistência do solo a penetração foram detectados mais próximos do limite de contração do solo. Esta informação dá credibilidade aos ensaios e resultados de RP.

A análise descritiva do índice de cone da área de plantio direto com e sem escarificação são apresentados nas Tabelas 8.

Os valores das médias da análise descritiva do PDCE foi menor em relação ao PDSE.

Colet et al. (2009) encontrou valores 1000 a 1758 kPa para o manejo escarificado, valores abaixo dos encontrados nesta avaliação e valores semelhantes para sem escarificação, constatando que a subsolagem diminuiu a resistência a penetração do solo.

Tabela 8. Análise descritiva do índice de cone (kPa) para a área de Plantio Direto com escarificação.

Profundidade m	N	Média	S	Mínimo	Máximo	CV(%)	C <sub>s</sub>	C <sub>k</sub>
0 - 0,10	51	2266	705	949	4037	31,11	0,71	0,1
0,10-0,20	52	3155	731	1576	4750	23,18	0,04	-0,35
0,20-0,30	52	2564	608	780	3737	23,72	-0,65	0,91
0,30-0,40	50	2335	504	1069	3517	21,59	-0,27	0,28

N: número de amostras; s: desvio padrão; CV (%): coeficiente de variação; C<sub>s</sub>: coeficiente de assimetria; C<sub>k</sub>: coeficiente de Curtose.

Na Tabela 9 estão apresentados os modelos e parâmetros dos semi-variogramas para o índice de cone da área de plantio direto com escarificação (PDCE). Este atributo ajustou-se ao modelo exponencial e apresentou efeito pepita puro (variância zero). Segundo Vieira (2000), os valores do alcance da dependência espacial fornecem informações significativas para planejamento e avaliação experimental, pois, indica até que distância os pontos são correlacionados entre si. O maior alcance de dependência espacial foi encontrado para a faixa de profundidade de 0,30 a 0,40 m com valor de 56,7 m. A menor distância entre amostras foi obtida para a faixa de profundidade de 0 a 0,10 m com um alcance de 54,3 m. A dependência espacial de um atributo depende da escala de amostragem, profundidade, topografia, manejo da cultura e do solo, entre outros. As faixas de profundidade de 0 a 0,10 m e 0,30 a 0,40 m apresentaram forte dependência espacial ( $IDE \geq 75\%$ ), conforme os intervalos apresentados por Zimback (2001).

Segundo Tormena (2002), valores de RSP entre 2 e 3 MPa são considerados limitantes do desenvolvimento radicular.

Para Mata et al. (1999), a aração não alterou o índice de cone na camada intermediária. Por outro lado, a escarificação sim, reduziu a resistência média à penetração, aumentando a sua variabilidade.

A análise dos dados mostra que a variável estudada apresentaram, de alguma maneira, dependência espacial, com efeito pepita. Nesses casos, (tabela 9) houve uma clara indicação de que esta variável tem dependência espacial bastante errática, apresentando distribuição aleatória em espaçamento bastante próximo da distância amostrada, que correspondeu a uma grade de 25 m.

Segundo Mata et al. (1999), a parcelas sob aração se mostraram sem estrutura. Para a escarificação, a estrutura se manifesta de forma bem definida, com alcance da ordem de 15m e efeito pepita nulo, evidenciando a estreita correlação espacial entre as propriedades.

Tabela 9. Modelos e parâmetros dos variogramas do índice de cone para a área de Plantio Direto Com Escarificação.

Profundidade (m)	Modelo	Alcance	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	r <sup>2</sup>	IDE
0 - 0,10	Exponencial	54,3	40000	486700	85	92
0,10-0,20	Efeito pepita puro				0	0
0,20-0,30	Efeito pepita puro					
0,30-0,40	Exponencial	56,7	39000	244000	73	84

C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; r<sup>2</sup>: coeficiente de correlação; IDE: índice de dependência espacial

O comportamento espacial dos dados obtidos nas faixas de profundidade 0 a 0,10 m e 0,30 a 0,40 m, foram analisados através de semi-variogramas (Figura 9).

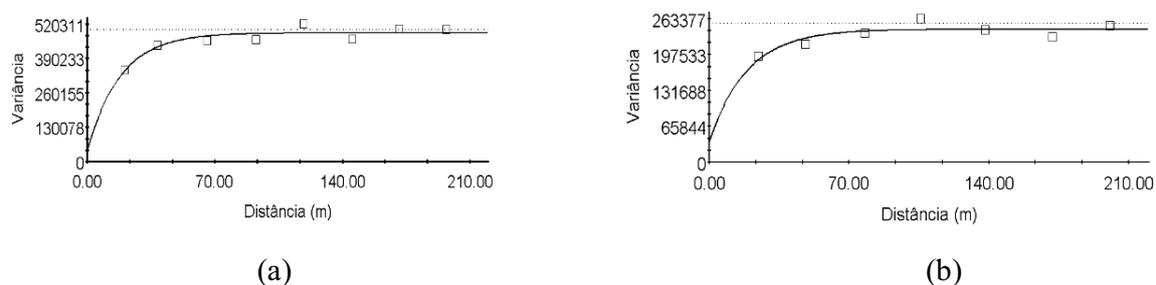


Figura 9. Semivariogramas da resistência do solo a penetração do sistema de Plantio direto com escarificação 0 a 0,10 m (a) e 0,30 a 0,40 m (b).

Mata et al. (1999), avaliando relação entre produtividade e resistência à penetração em área irrigada por pivô central, sob dois sistemas de preparo (aração e escarificação) observou que o índice de cone e produtividade não se distribuem aleatoriamente na área. Apresentam estrutura de dependência espacial descrita por semivariogramas com alcance da ordem de 10 metros.

A área escarificada que apresentou maiores valores do índice de cone foi a faixa de 0,10 a 0,20 m com 3155 kPa podendo indicar que a carga do tráfego de máquinas está sendo descarregada no solo nesta profundidade.

A escarificação mecânica tem sido sugerida para aliviar a compactação do solo em áreas de semeadura direta, (Câmara e Klein, 2005), pois reduz a densidade do solo e melhora a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água em áreas de plantio direto escarificado. No entanto, o seu efeito é temporário e o solo escarificado tende a se reconsolidar, retornando em pouco tempo à sua condição original (Busscher et al., 2002), exigindo a repetição da operação regularmente.

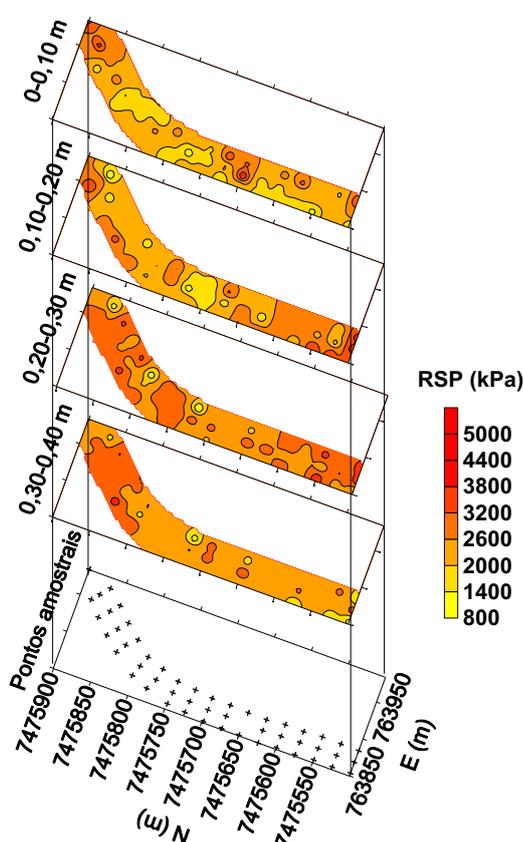


Figura 10. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 0 a 0,40 m do sistema de Plantio Direto com escarificação, interpolados pelo inverso do quadrado da distância.

Sene et al. (1985) consideram críticos os valores de RP que variaram de 6,0 a 7,0 MPa, para solos arenosos, e em torno de 2,5 MPa, para solos argilosos.

A metade da variável apresentou coeficientes de assimetria positivos, sendo o maior valor para a profundidade de 0 a 0,10 m (0,30), o menor para a profundidade de 0,30 a 0,40 m (0,13). Coeficiente de assimetria negativo também foi verificado para a profundidade de 0,10 a 0,20 m, de -0,36 e para a profundidade de 0,20 a 0,30 m, de -0,50.

Os resultados da análise descritiva do índice de cone da área de plantio direto sem escarificação estão apresentados da Tabela 10.

Tabela 10. Análise descritiva de índice de cone para área de Plantio Direto sem escarificação.

Profundidade (m)	N	Media	S	Mínimo	Máximo	CV (%)	C <sub>s</sub>	C <sub>k</sub>
0-0,10	49	2307	674	986	3850	29,22	0,3	-0,61
0,10-0,20	49	3768	868	1723	5438	23,04	-0,36	-0,22
0,20-0,30	48	2779	605	1028	4105	21,76	-0,5	0,73
0,30-0,40	49	2532	551	1370	3771	21,75	0,13	-0,36

N: número de amostras; s: desvio padrão; CV(%): coeficiente de variação; C<sub>s</sub>: coeficiente de assimetria; C<sub>k</sub>: coeficiente de Curtose

O PDSE apresentou a mesma faixa limitante que o PDCE, na profundidade de 0,10 a 0,20 m.

Com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), o coeficiente de variação apresentou-se médio ( $12\% < CV < 60\%$ ) para todas as profundidades do solo analisados. Os CVs médios podem ser atribuídos a uniformidade da área estudada.

O índice de cone do solo ajustou-se ao modelo exponencial para profundidades de 0,0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m (Tabela 11). As profundidades de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m não apresentaram dependência espacial.

Tabela 11. Parâmetros do variograma da resistência do solo à penetração em área de Plantio Direto sem escarificação.

Profundidade (m)	Modelo	Alcance	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	r <sup>2</sup>	IDE
0-0,10	Efeito pepita puro					
0,10-0,20	Efeito pepita puro					
0,20-0,30	Exponencial	53,7	22000	355300	70	94
0,30-0,40	Exponencial	102,3	32700	302500	88	89

C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; r<sup>2</sup>: coeficiente de correlação; IDE: índice de dependência espacial

Os pontos coletados com distâncias maiores que o alcance são independentes e, para sua análise utiliza-se a estatística clássica (Vieira, 2000). O maior

alcance de dependência espacial foi encontrado para a profundidade de 0,30 a 0,40 m com valor de 102,3 m. A menor continuidade espacial foi para a profundidade de 0,20 a 0,30 com um alcance de 53,7 m.

Fidalski et al. (2006) encontrou valores de resistência à penetração maiores que 2,0 MPa em plantio direto e menores que 2,0 MPa em plantio direto removido (escarificado) e os mapas indicaram que os valores de RP apresentaram amplitudes diferenciadas dentro e entre os sistemas de manejo avaliados, dependentes das camadas e das épocas de amostragens.

Para Camara e Klein (2005), a escarificação esporádica em solos sob plantio direto proporciona condições físico-hídricas mecânicas do solo mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas, especificamente pela redução na resistência mecânica à penetração e pela não redução do teor de matéria orgânica.

Os mapas da área de plantio direto sem escarificação apresentaram duas faixas mais compactadas: de 0,10 a 0,20, de 0,20 a 0,30 m (Figura 12), mostrando as regiões que sofreram as pressões exercidas pelo tráfego de máquinas e que não são mobilizadas no Sistema de Plantio Direto.

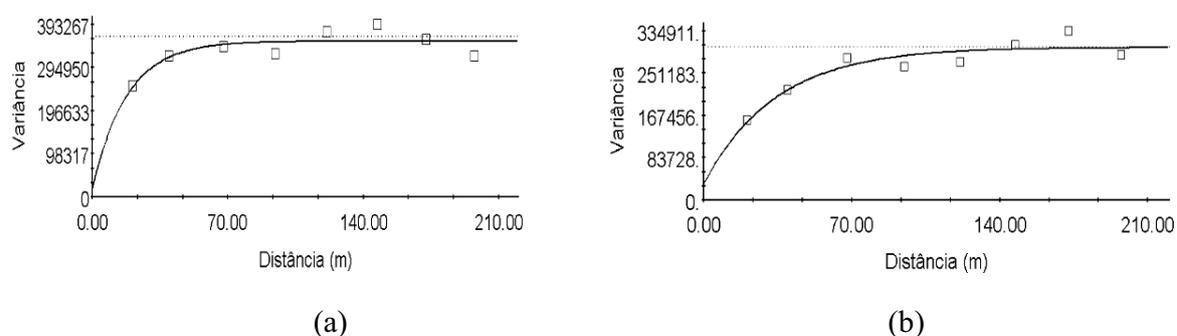


Figura 11. Semivariogramas da resistência a penetração do sistema de Plantio direto sem escarificação 0 a 0,30 m (a) e 0,30 a 0,40 m (b).

Através da mensuração do índice de cone em grade amostral, Acosta (2008), em áreas de Nitossolo Vermelho com plantio direto, constatou a ocorrência de valores menos elevados (2,61 a 8,98 MPa) na superfície, como também evidenciou que as variabilidades espaciais da compactação apresentaram diferentes intensidades em função do conteúdo de água no solo e essa variabilidade também existiu em profundidade.

Para Reichert et al. (2007) a profundidade de compactação é variável em função das especificações da máquina e de seu rodado, condições do solo, número de vezes em que o solo é trafegado e do seu histórico de pressões, além do manejo (se pastagem, floresta ou agrícola).

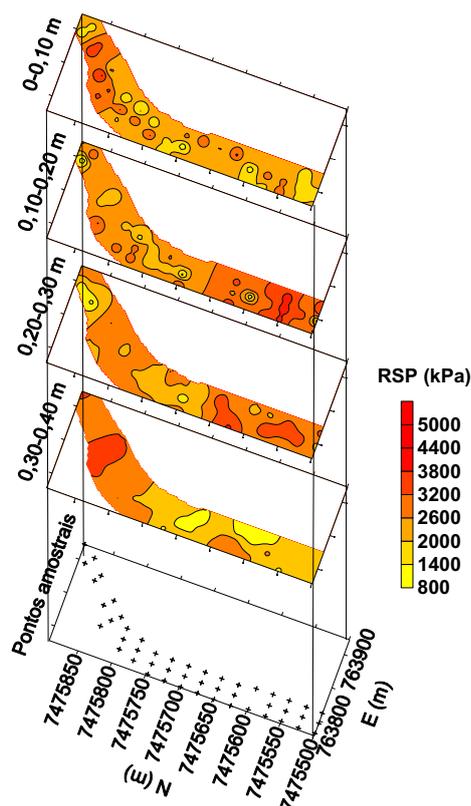


Figura 12. Mapa de isocompactação do solo à profundidade de 0 a 0,40 m no sistema de plantio direto sem escarificação, interpolados pelo inverso do quadrado da distância.

Segundo Acosta (2008), os valores médios do índice de cone na profundidade de 0,0 a 0,10 m e teor de água no solo, de um Latossolo Vermelho com vegetação espontânea, flutuaram entre 1,42 e 8,99 MPa e 9,59 a 17,63 % respectivamente. Em um Neossolo Flúvico com sistema convencional, os valores de índice de cone e teor de água estiveram entre 0,30 e 5,65 MPa, e 13,64 a 27,92 % respectivamente.

Quando o teor de água aumenta, a RP diminui pela redução das forças de coesão que atuam entre as partículas de solo e aumento das forças de adesão, mudando a

consistência de friável para plástica, atingindo valores limitantes ao crescimento de raízes em condições de baixo teor de água (HILLEL, 1998).

Com o secamento do solo, os valores de RP podem atingir níveis altamente impeditivos ao crescimento radicular (acima de 3,5 MPa), segundo TORRES e SARAIVA (1999).

A Figura 13 mostra através da curva que na camada de 0,20 m para ambos manejos ocorreram um aumento na resistência do solo a penetração.

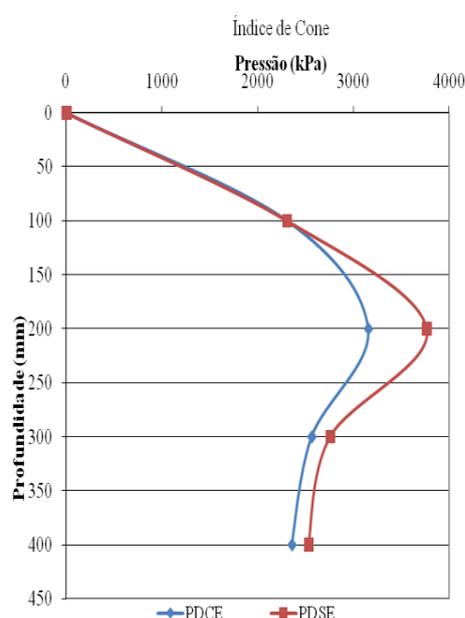


Figura 13. Gráfico de Índice de Cone do solo nas áreas de plantio direto com e sem escarificação.

Segundo Rosolem et al. (1999), a RP da ordem de 1,3 MPa reduz à metade o crescimento das raízes seminais adventícias do milho.

#### 6.4. Compressibilidade do solo

Os valores médios de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) obtidos dos ensaios de compressibilidade para cada camada avaliada dentro dos seus respectivos manejo (PDCE e PDSE) são apresentados na Tabela 12. Devido ao efeito da escarificação é observado que no PDCE os valores de  $\sigma_p$  entre camadas não diferiram estatisticamente, o que pode ser

explicado pelo alívio das tensões, em todas as camadas, como consequência da mobilização do solo. Contudo a falta de mobilização no PDSE confere à camada de 0,30 a 0,40 m um valor médio de  $\sigma_p$  da ordem de 380 kPa, sendo superior estatisticamente aos valores médios das demais camadas avaliadas. Estes resultados ressaltam a consolidação desta camada, muito embora, o efeito da mobilização não implique em diferenças significativas entre as profundidades.

O que indica que ela apresenta a maior concentração das tensões geradas pelo tráfego (COLLARES et al., 2008; SECCO et al., 2009).

Conforme Silva et al. (2006), a capacidade de suporte de carga na zona de friabilidade, variou de 204 a 210 kPa para a camada de 0–3 cm; de 179 a 222 kPa, para a camada de 10–13 cm, e de 165 a 234 kPa, para a camada de 25–28 cm. Por outro lado, quando o solo seca, a  $\sigma_p$  aumenta exponencialmente com a redução da umidade, aumentando sua capacidade de suporte de carga do solo, proporcionando um menor risco de ocorrência de compactação.

De acordo com Carpenedo (1994), as pressões médias normalmente aplicadas à superfície do solo pelas máquinas são próximas de 200 kPa.

Tabela 12. Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho em (kPa) com teste de médias para manejos e em relação a profundidades.

Camadas (m)	Tratamentos	
	PDCE	PDSE
<b>0-0,10</b>	280 A a	242,33 B a
<b>0,10-0,20</b>	249,83 A a	224,17 B a
<b>0,20-0,30</b>	253,83 A a	258 B a
<b>0,30-0,40</b>	316,83 A a	373,33 A a

**CV = 30,36; DP = 34,06**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido da colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Para Lima et al. (2006), valores de pressão superiores a 153 kPa podem implicar condições favoráveis ao tráfego e inadequadas para o crescimento das raízes. Por outro lado, Soane et al., (1981) indicaram pressões inferiores a 200 kPa e, preferencialmente, a 100 kPa para um efetivo controle e redução da compactação do solo.

A influência do teor de água sobre a pressão de preconsolidação e, por conseguinte na consolidação do solo estudado pode ser visto na Tabela 13, na qual se constata que quanto mais úmido (plástico) estiver o solo menor os valores de  $\sigma_p$  e a capacidade de suporte de carga.

Figura 13. Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho para PDCE em (kPa) na relação área de consistência em relação a profundidades.

Camadas (m)	PDCE	
	Friável	Plástica
<b>0-0,10</b>	353 A a	207 A b
<b>0,10-0,20</b>	365,33 A a	134,33 A b
<b>0,20-0,30</b>	393,33 A a	114,33 A b
<b>0,30-0,40</b>	515,33 A a	118,33 A b

**CV = 26,65; DP = 73,34**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido da colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

Por outro lado, os maiores valores de  $\sigma_p$  para o Nitossolo Vermelho na consistência friável revela não apenas o teor de água que este solo deve ser trabalhado, mas a maior capacidade de suporte de carga e certamente, a maior possibilidade de preservação e sustentabilidade da estrutura do solo, em toda a sua profundidade mobilizada.

Segundo Silva et al. (2006), avaliando uma operação com uma roçadora tracionada pelo trator Massey Ferguson na época seca apresentou tendência a compactar o solo menos do que em relação a estação chuvosa, este equipamento causou compactação em 60 % dos pontos amostrados na camada de 0–3 cm. Segundo este mesmo autor essa maior compactação deveu-se ao fato de ter sido o tráfego realizado em umidades acima do LP, o que conferiu ao solo, nesta umidade, baixa capacidade de suporte de carga.

Para Imhof et al., (2001), o solo quando úmido, apresenta baixa capacidade de suporte de carga.

Comportamento parecido também foi encontrado para a condição de PDSE (Tabela 14), todavia, diferente do observado no PDCE (Tabela 20), é verificado uma tendência de incremento na  $\sigma_p$  com o aumento da profundidade para a consistência plástica. Com diferença significativa, exclusivamente na camada 0 a 0,10 m. Isto, provavelmente, se deve aos maiores teores de argila e a consolidação do solo nas camadas mais profundas.

Figura 14. Compressibilidade de um Nitossolo Vermelho para PDSE em (kPa) na relação área de consistência em relação a profundidades.

Camadas (m)	PDSE	
	Friável	Plástica
<b>0-0,10</b>	368,67 A a	116 A b
<b>0,10-0,20</b>	285,67 A a	162,67 A a
<b>0,20-0,30</b>	303 A a	213 A a
<b>0,30-0,40</b>	451,67 A a	295 A a

**CV = 33,67; DP = 92,41**

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas no sentido da colunas e minúsculas no sentido das linhas, não diferiram significativamente entre si, pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5%.

## 7 CONCLUSÕES

O manejo do solo adotado proporcionou diminuição na densidade do solo no tratamento com escarificação nas profundidades de 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m.

Os dados de macroporos, microporos e a porosidade total para o solo estudado mostraram que a escarificação não apresentou variação destes atributos físicos para as diversas profundidades, após 2 anos de mobilização do solo.

A pressão de preconsolidação em associação com a consistência do solo possibilitou identificar que no manejo PDCE, todas as camadas quando submetidas ao teor de água referente à faixa de fiabilidade ofereceram uma maior capacidade de suporte de carga do solo e no PDSE, isto só foi possível na camada de 0 a 0,10 m, evidenciando a maior consolidação desta camada.

A escarificação promoveu melhores condições físicas do solo, tais como a redução da resistência à penetração entre as profundidades, mostrando as vantagens em relação ao plantio direto sem escarificação (PDSE).

O atributo de resistência do solo à penetração apresentou dependência espacial ajustando-se ao modelo exponencial nas profundidades de 0,20 a 0,30; 0,30,40 m para PDSE e 0,10 a 0,20; 0,30 a 0,40 m para PDCE. A profundidade de 0,30 a 0,40 m do manejo de PDSE apresentou o maior alcance (102,3 m) e, conseqüentemente, menor variabilidade espacial na área.

## 8 REFERÊNCIAS

ACOSTA, J. J. B. **Correlação entre índice de cone e o modelo de capacidade de suporte de carga de diferentes tipos de solos**. 2008. 167 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Produção e matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta à compactação do solo. **Revista Ceres**. v. 44, n. 254, p. 421-431, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE S313.2: Soil Cone Penetrometer**. St. Joseph, MI, 1997. 2 p.

ARZENO, J.L. **Avaliação física de diferentes manejos de solo em Latossolo Roxo distrófico**. Piracicaba, 1990. 259 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ASSIS, R. L; LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:507-514, 2005.

ASSIS, R.L. de. **Avaliação dos atributos físicos e da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa**. Botucatu, 2002. 128p. Tese (Doutorado) – FCA/UNESP.

ASSIS, R.L.; LAZARINI, G.D.; LANÇAS, K.P.; CARGNELUTTI, A.F. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com variação do teor de água. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.558-568, 2009.

ASHBURNER, J.E.; SIMIS, B.G. **Elementos de diseño Del tractor y herramientas de labranza**. San José: IICA, 1984. 474p.

ATTERBERG, A. **Über die physikalische bodenuntersuchung und über die plastizität der tone**, Inst. Mitt for Bodenkunde, v.1, 1911.

BARATA, F. E. **Propriedade mecânica dos solos: uma introdução ao projeto de fundações**. Rio de Janeiro: LTC, Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A., 1984.

BOWLES, J.A. **Engineering properties of soils and their measurements**. New York, McGraw-Hill, 1986. 218p.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J. & FREDERICK, J.R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil Till. Res.**, 68:49-57, 2002.

CAMARA, R. K.; VILSON ANTONIO KLEIN, V. A.; Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **R. Bras. Ci. Solo**, v29, p.789-796, 2005.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v35, n.4, p.813-819, 2005.

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

CAMBARDELLA, C.A. MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Sc. Soc. of Am. J.**, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARDOSO, V. M. F. **Capacidade de suporte de carga como indicador da qualidade estrutural de solos agrícolas em áreas irrigadas**. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2007.

CARDOSO, V. M. F.; LANCAS, K. P.; SILVA, R. B. Sustentabilidade estrutural de um solo na região do Alto Paranapanema/ SP, submetido a dois sistemas de cultivo. **Energ. Agric.**, Botucatu, vol. 23, n.3, 2008, p.108-142.

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

CARVALHO, E.J. et al. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p.257-265, 1999.

CARVALHO, T. M. **Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo através da Geoestatística**. Lavras, 1991, 84p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras, 1991.

CARVALHO, W. A. ESPÍNDOLA, C. R., PACCOLA, A. A. levantamento de solos da Fazenda Lageado - Estação Experimental "Presidente Médici". **Bol. Cient. Fac. Ciên. Agron. UNESP (Botucatu)**, n. 1, p. 1-95, 1983.

CASAGRANDE, A. The determination of the pré-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENC., FOUNDATION ENGINEERING. Cambridge, 1936. **Proceeding**. Cambridge: MA Harvard University, 1936. p. 60-64

COLET, M.J.; SVERZUT, C.B.; WEIRICH, P. H.N.; SOUZAS, Z.M. Alteração em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 33, n. 2, p. 361-368, 2009.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.32, p.933-942, 2008.

CUNHA, A.R., KLOSOWSKI, E.S., GALVANI, E., J.F., ESCOBEDO, MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. *Anais...* Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p.487-91.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1986. v.1, p.545-66.

DIAS JUNIOR, M. S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:1-8, 1996.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114 p. (Tese de Doutorado).

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, 1995.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - **EMBRAPA**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ENCIDE, A. P. **Métodos não convencionais para avaliação da porosidade e da densidade do solo de um latossolo vermelho.** Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2005.

FREITAS, V.A. **Análise de dados espaciais por meio de semivariogramas.** 34p. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) - Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

FERREIRA, D. F. Análise estatística por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windows versão 4.0. In: Reunião anual da região brasileira da sociedade internacional de biometria, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Teor de água crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Vermelho eutrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, n.3, p.487- 493, 2000.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S. Variabilidade espacial da resistência à penetração do solo e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um latossolo vermelho eutrófico. **Ciência Rural**, v.36, p. 1773-1779, 2006.

GATE, O.P.; CZYZ, E.A. & DEXTER, A.R. Soil physical quality S as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils. In: HORN, R.; FLEIGE, H.; PETH, S. & PENG, X. **Soil management for sustainability.** Reiskirchen, Catena Verlag, 2006. p.102-109.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada,** Uberlândia: UFU-FAMAT: Apostila, 2004, 77 p.

GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Adv. Soil Sci.**, 6:5-10, 1987.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Adv. Agron.**, v.42, p.311-338, 1989.

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

HILLEL, D. **Environmental soil Physics.** San Diego: Ed. Academic Press, 1998, 771p.

INOUE, T. T.; ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; ESTEVES, N.; MIGNOSO, V.; LEITE, J. C. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférrico após 13 anos de plantio direto. **In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E**

CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

IMHOF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:11-18, 2001.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo-SP, ed. Agronômica Ceres Ltda, 1979.

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afri. Johannesburg**, v.52, p.119-139, 1951.

Köppen, W. 1948. Climatologia: com um estudo de los climas de la tierra. Publications In: Climatology. Laboratory of Climatology, New Jersey. 104p.

LAL, R.; LOGAN, T. J.; FAUSEY, N. R. Long term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained mollic ochraqualf in northwest Ohio. I. Soil physical properties, root distribution and grain yield of corn and soybean. **Soil Tillage Research**, v. 14, p. 341-55, 1989.

LANÇAS, K. P. **A compactação do solo Agrícola**. Monografia, Botucatu-SP, 1996, 22 p.

LANÇAS, K. P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas**. 1996. 172 f. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1996.

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.

LANÇAS, K. P.; CASTRO NETO, PEDRO; NAGAOKA, ALBERTO K; GUERRA, SAULO P S. Índice de cone e mapas de isocompactação do solo agrícola, obtidos com a utilização de um penetrômetro hidráulico-eletrônico e um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS). In: LUIZ ANTONIO BALASTREIRE. (Ed.). **O Estado da Arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. 1.ed. Piracicaba: ESALQ, 2000. p.113-123.

LANÇAS, K. P. Preparo do solo: Subsolagem ou escarificação. **Revista Cultivar Máquinas**. 2002.

LANÇAS, K.P.; UPADHYAYA, S.K. Pneus radiais para tratores: Guia para seleção correta da pressão de inflação. **En. na Agr.**, v.12, n.1, p.33-36. 1997.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo, Ed. UNESP, 1998. 226p.

- LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Texto Didático 06. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE, 2002.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. 2ª ed. **Piracicaba: O autor**. 1999. 497p.
- LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. Compressibilidade de um argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1765-1772, 2006.
- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P.; Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:945-951, 2004
- MANTOVANI, E. C. Compactação do Solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.17, p. 52-55, 1987.
- MARASCA, I.; LANÇAS, K. P.; MONTEIRO, L. A.; MASIERO, F. C.; Compactação do solo pelo tráfego de colhedoras de cana-de-açúcar e de caminhões transbordo. **In: X Congresso Ingeniería Rural y II Del Mercosur**, Santa Fé - Argentina. CD – Rom, p.556 – 2009.
- MATHERON, G. **Principles of geostatistics**. *Econ. Geology*, 58: 1246-1266, 1963.
- MATA, J.D.V.; CONÇALVES, A.C.A.; VIEIRA, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Relação entre produtividade e resistência à penetração em área irrigada por pivô central, sob dois sistemas de preparo. **Acta Scientiarum**, v.21, p.519-525, 1999.
- McBRATNEY, A.B; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variogramas of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, 1986.
- MIRANDA, E. E.V; LANÇAS, K. P; SILVA,R. B. Modelagem e mapas da capacidade suporte de carga de um latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Energ. Agric.**, Botucatu, vol. 22, n.4, 2007, p.42-54.
- MIRANDA, E. E.V. **Modelagens e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2006. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; ROSA, D.P.; VEIRA, D.A.; ROSA, V.T.; REINERT, D.J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesq. Agropec.bras.**, Brasília, v.45, n.3, p.315-321, 2010.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, v.54, n. 2, p. 393-403, 1995.

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

NUNES, W. A. G. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; RUIZ, H. A.; BEIRIGO, R. M.; & BONCOMPANI, A. L. P.; Caracterização químicas de solo da região de Janaúba, MG, irrigados com água de poços tubulares e do Rio Gorutuba. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:227-236, 2008

PRADO, R. M.: e CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 197-203, jan. 2001

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

RALISH, R.; TAVARES FILHO, J.; ALMEIDA M.V.P. Avaliação de um argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo a penetração. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 30. Foz do Iguaçu, 2001. Resumo expandido. Foz do Iguaçu, CONBEA, 201. CD-ROM.

REICHERT, J.M.; REINERT, J.M.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REINERT, D.J.; ALBURQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

RESCK, D. V. S. O plantio direto como alternativa de sistema de manejo e conservação do solo e da água na região dos cerrados. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 27, Brasília, 1999. *Resumo expandido*. Brasília: SBCS, 1999. CD-ROM.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Autores, 2004. 302p.

ROMEIRO, A. R. **Meio ambiente e dinâmica de inovações na agricultura**. São Paulo: Annablume / FAPESP, 1998. 277 p RS, Universidade Federal de Pelotas, CD, 2001.

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, n.5, p.821-828, 1999.

SANTOS, G; CAMARGO, F. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

SENE, M.; VEPRAAKAS, M.J.; NADERMAN, G.C.; DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n.2, p.795-801, 2002.

SCOTT, A.J. & KNOTT, M.A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, 30:507-512, 1974.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v.39, p.58-64, 2009.

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

SILVA, A. J. N; CABEDA, M. S. V; Compactação e compressibilidade do solo sob sistema de manejo e níveis de umidade. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:921-930, 2006

SILVA, R. B. da **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. Lavras, 2002, 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

SILVA, R. B. S.; CARDOSO, V. M. F. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de solos sob irrigação de pivô central da fazenda Buriti-Mirim. **In: LANÇAS, K. P.; SAAD, J. C.; SILVA, R. B. S. (Org). Sustentabilidade dos solos agrícolas da bacia hidrográfica do Alto Paranapanema em função da disponibilidade hídrica e do tráfego de máquinas**. Botucatu, 2005, v. 1, p. 35-62.

- SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MASQUETTO, B.J. Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 2007.
- SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **R. Bras. Ci. Solo**, 27: 961-971, 2003.
- SILVA, R. B.; LIMA, J. M.; e DIAS JUNIOR, M. S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:219-226, 1999.
- SILVEIRA, G. M. **O preparo do solo: implementos corretos**. Rio de Janeiro: Globo, 1988. 243p.
- SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v.16, n.1/2, p.179-201, 1990.
- SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.
- SOANE, B.D. et al. Compaction by agricultural vehicles: a review II. Compaction under tyres and other running gear. **Soil and Tillage Research**, v.1, p.373-400, 1981.
- SOWERS, G.F. Consistency. In: BLACK, C. A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.391-399.
- STEINHARDT, G.C. **Compactação do solo: um problema oculto**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 3p. (Informações Agronômicas, v.21)
- STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro -1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-12, 2002.
- TAYLOR, J. H.; BURT, E. C.; BAILEY, A. C. Radial tire performance in firm and soft soils. St Joseph: **ASAE**, 1979. 7p. (ASAE. Paper, 76-1036).
- TIJINK, F.G.J., DOLL, H., VERMEULEN, G.D. Technical and economic feasibility of low ground pressure running gear. **Soil & Tillage Res.**, v.35, p.99-110, 1995.
- TORMENA, C.A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.333-339, 1996.
- TORMENA, C. A. A compactação do solo em agroecossistemas agrícolas. **In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA**, 14., 2002, Viçosa. Anais... Viçosa, MG: sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. 4p. CD ROM.

- TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23).
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.
- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil, Ed. USP, 1977.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, G. & NIELSEN, D.R. The use of cokriging with limited field observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 47: 175-184, 1983.
- VEENHOF, D.W. & MCBRIDE, R.A. Overconsolidation in agricultural soils: I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:362-373, 1996.
- VIEIRA, L. S., SANTOS, P. C. T. C., VIEIRA, N. F. **Solos: propriedades, classificação e manejo**. Brasília: MEC/ ABEAS, 1998.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties, **Hilgardia**, Berkeley, v,51, n,3, p,1-75, 1983.
- VIEIRA, S. R. **Curso de atualização em conservação do solo - uso da geoestatística**. Seção de Conservação do Solo. Parte I. Campinas, IAC, v. 1 e 2, 1995.
- VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas(SP). **Bragantia**, vol. 56, n.1, Conservação do solo, VIII: 1-13. Campinas, 1997.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 45: 1040-1048, 1981.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. Cap.2, p.319-344.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2001.

ZIMBACK, C.R.L. **Geoestatística**. Apostila didática, FCA/UNESP, jun. 2003. 25p.