

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

**MODELAGEM E MAPAS DE CAPACIDADE SUPORTE DE CARGA DE  
SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

**ELKA ÉLICE VASCO DE MIRANDA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Junho - 2006

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

**MODELAGEM E MAPAS DE CAPACIDADE SUPORTE DE CARGA DE  
SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR**

**ELKA ÉLICE VASCO DE MIRANDA**

**Orientador: PROF. TITULAR KLÉBER P. LANÇAS**

**Co-Orientador: PROF. DR. REGINALDO BARBOZA DA SILVA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Junho – 2006

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

M672m Miranda, Elka Elice Vasco de , 1975-  
Modelagem e mapas de capacidade suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar / Elka Elice Vasco de Miranda . - Botucatu : [s.n.], 2006.  
ix, 97 f. : il., color., gráfs, tabs.

Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006

Orientador: Kleber Pereira Lanças

Inclui bibliografia

1. Agricultura de precisão. 2. Solos - Compactação. 3. Mecanização. 4. Agricultura-Mapas. 5. Cana-de-açúcar. I. Lanças, Kleber Pereira. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

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

**TÍTULO: "MODELAGEM E MAPAS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA  
DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR"**

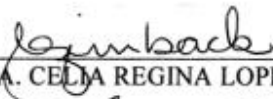
ALUNA: ELKA ÉLICE VASCO DE MIRANDA

ORIENTADOR: PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS  
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. REGINALDO BARBOZA DA SILVA

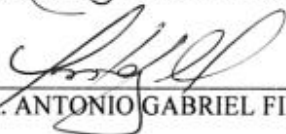
Aprovado pela Comissão Examinadora



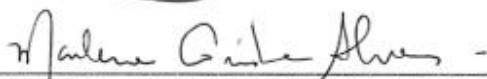
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. REGINALDO BARBOZA DA SILVA



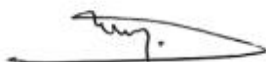
\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. CELMA REGINA LOPES ZIMBACK



\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ANTONIO GABRIEL FILHO



\_\_\_\_\_  
PROFA. DRA. MARLENE CRISTINA ALVES



\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MOACIR DE SOUZA DIAS JUNIOR

Data da Realização: 09 de junho de 2006.

## AGRADECIMENTOS

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

À coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Grupo Costa Pinto pelo fornecimento das áreas para a realização deste projeto.

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

À todos os professores que contribuíram para minha formação. Agradeço não somente os professores desta unidade, mas todos aqueles que me ajudaram a vencer mais esta árdua batalha.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Rural pelo companheirismo e ajuda e em especial a Ailton, Sílvio, Gilberto e Amauri.

Aos grandes amigos, Edmilson Ruiz, Edilene (Biru), Lílian, Jader, Moisés, Caetano, João Lopes, Rodolfo, Sarita, Vanessa, Renato Lara de Assis, Alcivânia, Reginaldo e Denise Mahal que de uma forma ou de outra me ajudaram nesta etapa da minha vida.

Por último, mas não menos importante a Fábio Henrique Rojo Baio, pelo companheirismo e amizade, pela indispensável ajuda e apoio na fase final deste trabalho.

Dedico este trabalho à Kélice Vasco de Miranda Baio e ao Fábio Henrique Rojo Baio.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	3
3 INTRODUÇÃO .....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
4.1 Influência do tráfego agrícola na cultura da cana-de-açúcar.....	7
4.2 Influência do tráfego e de outros fatores sobre a estrutura do solo.....	11
4.3 Variabilidade espacial .....	17
4.4 Avaliação da resistência mecânica do solo .....	22
4.4.1 Compressibilidade do solo .....	22
4.4.2 Resistência mecânica do solo à penetração .....	29
4.4.3 Espacialização da resistência mecânica do solo .....	32
5 MATERIAL E MÉTODOS .....	35
5.1 Caracterização da área experimental.....	35
5.2 Obtenção e tratamento das amostras e de seus resultados .....	36
5.2.1 Modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) .....	36
5.2.2 Mapas de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS).....	37
5.2.2.1 Análise estatística dos dados amostrados .....	38
5.2.2.2 Análise geoestatística dos dados amostrados .....	39
5.2.2.3 Interpolação dos dados amostrados .....	40
5.3 Obtenção da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ).....	41
5.4 Sistematização e análise dos resultados .....	43
5.5 Índice de cone .....	44
5.6 Atributos físicos dos solos: Ds, textura, porosidade, limites de consistência. ....	47
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
6.1 Estatística descritiva e geoestatística dos atributos dos solos: argila, silte, areia e matéria orgânica .....	51

6.1.1 Variabilidade espacial dos atributos dos solos: argila, silte, areia e matéria orgânica .....	53
6.2 Capacidade de suporte de carga e a consistência do solo .....	54
6.3 Compressibilidade e a capacidade de suporte de carga dos solos avaliados.....	58
6.3.1 Estatística descritiva e geoestatística da capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) sob diferentes teores de água para as duas profundidades avaliadas .....	66
6.3.2 Mapas da capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) para diferentes teores de água e em duas profundidades.....	69
6.4 Mapas de Índice de Cone (IC) .....	71
7 CONCLUSÕES .....	78
8 REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS.....	79

## LISTA DE FIGURAS

	<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).....	27
2. Procedimento para a coleta de amostras indeformadas a serem ensaiadas em laboratório: (a) limpeza do terreno ou acesso a camada subsuperficial (profundidade 2); (b) coleta da amostra com o anel; (c) limpeza da amostra; e (d) embalagem e identificação da amostra. ....	37
3. Espacialização dos pontos amostrados para elaboração dos mapas de capacidade de suporte de carga do solo.....	38
4. Procedimentos laboratoriais para realização dos ensaios de compressibilidade e obtenção da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ). LC (Limite de Contração), LL (Limite de Liquidez) e LP (Limite de Plasticidade). Consolidômetro desenvolvido por Silva et al. (2005a).....	43
5. Vista do penetrômetro hidráulico eletrônico. (1) pistão hidráulico, (2) célula de carga, (3) haste de penetrômetro, (4) cone do penetrômetro, (5) potenciômetro de deslocamento, polia de enrolamento e cabo, (6) válvula de acionamento hidráulico, (7) mangueiras hidráulicas, (8) engates rápidos, (9) válvula reguladora de vazão de precisão, (10) assento do operador, (11) carreta de transporte, (12) torre de sustentação do pistão, (13) coletor de dados e (14) pino de engate. ....	44
6. Vista do penetrômetro hidráulico eletrônico equipado com sistema DGPS e suas aplicações a campo. ....	45
7. Vista do sistema de direcionamento via satélite e do sensor de rotação. ....	46
8. Esquema hipotético da utilização do sistema de direcionamento via satélite por barra de luz e sensor de rotação durante a formação das malhas.....	46



9. Densidade do solo inicial (Dsi) da profundidade 0,0 a 0,025 m (1) e de maior resistência mecânica (2) em seus respectivos talhões.....	48
10. Volume total de poros (VTP) da profundidade 0,0 a 0,025 m (1) e de maior resistência mecânica à penetração (2) em seus respectivos talhões. ....	50
11. Variogramas referentes aos valores de Areia (a), Silte (b), Argila (c) e Matéria Orgânica (d) obtidos no Talhão III <sub>LV</sub> .....	53
12. Ilustração da variabilidade espacial dos atributos Areia (A) (g Kg <sup>-1</sup> ), Silte (B) (g Kg <sup>-1</sup> ), Argila (C) (g Kg <sup>-1</sup> ) e MO (Mg m <sup>-3</sup> ) (D) para o Talhão III <sub>LV</sub> . ....	54
13. Resistência mecânica das grades e mata, avaliada a partir dos modelos de capacidade de suporte de carga, nas profundidades 1 e 2. ....	58
14. Modelos de capacidade suporte de carga de um Latossolo Vermelho distrófico, nas profundidades 1 e 2 para duas grades amostradas no talhão I <sub>LV</sub> e II <sub>LV</sub> . ....	61
15. Modelos de capacidade suporte de carga de um Neossolo, nas profundidade 1 e 2 para o talhão VII <sub>R</sub> e uma área de referência VIII <sub>Rmata</sub> . ....	63
16. Modelos de capacidade suporte de carga de um Argissolo, para as profundidades 1 e 2 dos talhões IV <sub>PV</sub> , V <sub>PV</sub> e IV <sub>PV</sub> . ....	64
17. Modelos de capacidade suporte de carga de um Argissolo Vermelho-amarelo, nas profundidades 1 e 2, para os talhões IV <sub>PV</sub> , V <sub>PV</sub> e VI <sub>PV</sub> . ....	65
18. Modelo de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho para as profundidades 1 + 2 do talhão III <sub>LV</sub> .....	66
19. Variogramas referentes a capacidade de suporte de carga obtidos para o talhão III <sub>LV</sub> e em diferentes teor de água (a) Teor de água de 0,05 Kg Kg <sup>-1</sup> profundidade 1, (b) Teor de água de 0,05 Kg Kg <sup>-1</sup> profundidade 2, (c) Teor de água Região de Friabilidade profundidade 1, (d) Teor de água Região de Friabilidade profundidade 2, (e) Teor de água de Saturação profundidade 1 e (f) Teor de água de Saturação profundidade 2.....	68
20. Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ - kPa) do Talhão III <sub>LV</sub> , na região de consistência de tenacidade em função das duas profundidades avaliadas. ....	70
21. Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ - kPa) do Talhão III <sub>LV</sub> , na região de consistência de friabilidade em função das duas profundidades avaliadas.....	70

22. Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$  - kPa) do Talhão III  $I_{LV}$ , na região de consistência de plasticidade em função das duas profundidades avaliadas. .... 71
23. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Latossolo Vermelho, nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão  $I_{LV}$  e  $II_{LV}$ . .... 73
24. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Neossolo Quartzarênico (R), nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão  $VII_R$ . .... 74
25. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Argissolo Vermelho-amarelo (PV), nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão  $IV_{PV}$  e  $V_{PV}$ . .... 75
26. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Argissolo Vermelho-amarelo, nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão  $VI_{PV}$ . .... 76
27. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Latossolo Vermelho nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do Talhão  $III_{LV}$ . .... 77

## LISTA DE QUADROS

	<b>Página</b>
1. Número e área dos talhões avaliados, tipo de solo, variedades, estágio da cultura (ciclo) e alguns dados de produtividade da área avaliada.....	35
2. Valores médios de textura e densidade ( $D_{s_i}$ : densidade do solo inicial; $D_{s_{op}}$ : densidade do solo na pressão de preconsolidação) de um Latossolo Vermelho distrófico (LV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PV) e um Neossolo Quartzarênico (R), em suas respectivas profundidades (1: 0,0 a 0,025 m; 2: camada de maior resistência mecânica à penetração). ....	49
3. Resultados da análise estatística descritiva realizada dos atributos dos solos: areia, silte, argila e matéria orgânica. ....	51
4. Modelos e parâmetros, referentes aos variogramas ajustados, para os valores de areia, silte, argila e matéria orgânica, obtidos para o Talhão III <sub>LV</sub> .....	52
5. Limites de consistência (LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade; LC - limite de contração), volume total de poros (VTP), densidade do solo inicial ( $D_{s_i}$ ), densidade do solo na pressão de preconsolidação ( $D_{s_{op}}$ ) e a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) para cada limite de consistência. ....	55
6. Parâmetros dos modelos $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação. ....	56
7. Parâmetros dos modelos $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação. À direita, comparação das equações obtidas entre profundidade para cada talhão e entre talhão para cada profundidade, segundo proposições de Snedecor & Cochran (1989). ....	59
8. Resultados da análise estatística descritiva realizada para a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) e em diferentes teores de água em duas profundidades estudadas.....	67

9. Modelos e parâmetros, referentes aos variogramas ajustados, para os valores de capacidade de suporte de carga obtidos para o talhão III <sub>LV</sub> e em diferentes teores de águas. ....	67
--	----

## **1 RESUMO**

Novos estudos devem propor e quantificar o nível de carga que um determinado solo e sob que condição específica de manejo estaria apto este solo a receber, sem sofrer significativas alterações físicas e compactação adicional em suas camadas.

Os objetivos deste trabalho foram quantificar a pressão de preconsolidação, sugerindo-a como indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural dos solos cultivados com cana-de-açúcar; obter modelos que permitam prever o comportamento da estrutura dos solos cultivados com cana-de-açúcar em função da pressão de preconsolidação e do teor de água; obter os mapas de tráfego agrícola em função do teor de água e da pressão de preconsolidação do solo a partir de recursos geoestatísticos; e avaliar a resistência mecânica do solo à penetração, com base no índice de cone e variação do teor de água nos diferentes tipos de solos.

Para tanto, foram coletadas amostras de diferentes classes de solo de seis talhões cultivados com cana de açúcar e com áreas que variam de 4,88 a 17,86 ha. Foram utilizados recursos estatísticos e geoestatísticos para a elaboração dos mapas que ilustraram a variabilidade espacial de diferentes atributos físicos dos solos estudados.

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos solos em função pressão de preconsolidação e do teor de água obtidos foram sensíveis na identificação da degradação da estrutura, identificando camadas e áreas de maior resistência mecânica, assim como, possíveis irregularidades quanto a homogeneidades das operações de preparo do solo no talhão. A utilização da geoestatística e do mapeamento dos atributos estudados revelou-se

uma ferramenta promissora para tomada de decisões em sistemas de uso do solo com a cultura de cana-de-açúcar, visando, sobretudo a sustentabilidade da estrutura do solo. A obtenção de mapas de capacidade de suporte de carga constituiu em uma ferramenta eficiente na predição da capacidade de suporte de carga do solo e na localização de áreas estruturalmente comprometidas. Estas informações são úteis para orientar os técnicos na tomada de decisões de realizações das operações mecanizadas. O índice de cone (IC) mostrou-se um indicador sensível na avaliação da resistência mecânica dos solos cultivados com cana-de-açúcar. Os mapas da variabilidade espacial de isocompactação, elaborados a partir de recursos geoestatísticos, podem ser utilizados como importantes ferramentas na localização de regiões estruturalmente comprometidas, permitindo em manejos futuros a melhor adequação das operações mecanizadas destinadas a descompactar o solo.

**MODELING AND LOAD CAPACITY MAPS OF SOILS CROPPED WITH SUGAR CANE. Botucatu, 2005. 118p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.**  
**Author: ELKA ÉLICE VASCO DE MIRANDA**  
**Adviser: PROF. TITULAR KLÉBER P. LANÇAS**

## **2 SUMMARY**

New studies must consider and quantify the load level that a determined soil can receive and in what management condition this soil can be handled without suffering physical alterations and additional compaction.

The objectives of this work were to quantify the preconsolidation pressure, suggesting it as a quantitative indicator of the soil structural sustentabilidade cultivated with sugar cane; to get models that allow to predict the behavior of the soil structure cultivated with sugar cane in function of the preconsolidation pressure and the water content; to get agricultural traffic maps in function of water content and the preconsolidation pressure of the soil using geostatistics resources; and to evaluate the soil mechanical resistance, based on cone index and water content variation under several types of soils.

Soil samples from several soil classes were collected cropped with sugar cane and areas that varied from 4.88 and 17.86 ha. The maps that illustrated the spatial variability of the several physical attributes were made using statistical and geostatistical resources.

The models of the soil load capacity satisfactory modeled the behavior of the soil structure in function of the water content and depth, helping the maximum load prediction that this soil can receive without compromising its structure. The obtained models were sensible to identify the consolidation structure, identifying the layers and grids with huge mechanical resistance. The use of geostatistical tools and mapping the studied attributes showed a promising tool to take decisions about the system, aiming at, over all the soil structure sustentation. The maps of the soil load capacity constituted an efficient tool to locate

areas into the field with compromised structure, making possible to plan the correct dimension of the machinery to this field and decreasing the bad effects of the soil compaction. This information is useful also to guide the technician in decisions as, for example, the best moment after rains where the activities could be retaken. The maps that illustrate the spatial variability of the isocompaction can be used to locate areas with the compromised structure, allowing future management with best mechanized practices.

---

Keywords: soil compaction, load capacity maps, precision farming.



### 3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar e álcool. Na safra 2004/05, a produção de cana-de-açúcar no Brasil foi de 380 milhões de toneladas; em 132 mil hectares tiveram colheita mecanizada, sendo 65,7 % colheita mecanizada de cana picada crua. A atual safra (2006/07), cujo processamento começou em março, também deve atingir de 363 a 380 milhões de toneladas, segundo expectativas do mercado. Na região Centro Sul do Brasil em 70 % da área cultivada com cana-de-açúcar é possível efetuar a colheita mecanizada. Nas regiões Norte, Nordeste e Sudeste, apenas 30 % da área admitem este sistema de colheita.

A cana-de-açúcar tem uma grande importância econômica e social para toda a economia brasileira, embora sua produção seja frequentemente associada a impactos ambientais, tais como elevadas emissões de gases tóxicos na atmosfera devido à queima que normalmente antecede a colheita, a degradação dos solos e a poluição de mananciais e centros urbanos.

A cultura da cana-de-açúcar atende aos moldes da moderna monocultura e os solos sob seu cultivo têm sido os mais afetados, devido ao uso intensivo de máquinas agrícolas que atuam desde o preparo do solo (subsoladores e grades pesadas), durante (colhedoras e transbordos de 12 t) e mesmo após a colheita (pulverizações de herbicidas). Os impactos sobre o solo, especialmente sobre a sua estrutura, ocorrem por não haver um acompanhamento rígido do teor de água do solo ou de sua capacidade de suporte de carga no momento de realização das operações. Em decorrência dessa situação, além da

compactação, acentua-se o processo de erosão o qual tem sido responsável pela perda de milhões de toneladas de terra.

Uma exploração agrícola sustentável requer, entre outros fatores, a manutenção e ou melhoria da qualidade do solo, o conhecimento da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos, o que poderá contribuir para redução de custos nos sistemas de produção; porém, a intensificação da exploração agrícola, aliada ao uso e ao manejo inadequado do solo, tem provocado modificações negativas nas propriedades físicas e mecânicas do solo, implicando quase sempre na redução da produtividade das culturas.

A mecanização da colheita representa uma importante forma de se reduzir o custo de produção agrícola das usinas de cana-de-açúcar; entretanto, isso só é viável se estudos prévios da sustentabilidade da estrutura do solo desses pedoambientes onde a cana-de-açúcar estiver implantada forem implementados, monitorando os possíveis impactos que as colhedoras automatizadas podem causar ao solo. Dentro deste contexto, novos estudos devem propor e quantificar o nível de carga que um determinado solo, sob que condição específica de manejo estaria apto a receber, sem sofrer significativas alterações físicas e compactação adicional em suas camadas. Trabalhos a respeito do assunto sugerem estudos do comportamento compressivo e modelos de capacidade suporte de carga com base na pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), por predizer a máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes teores de água, sem causar compactação adicional permitindo, portanto, maiores condições na prevenção do fenômeno. Um dos indicadores mais eficientes para este tipo de monitoramento é o mapa de tráfego agrícola. Sendo assim, o desenvolvimento de um estudo que contemple a geração de mapas de tráfego agrícola a partir de modelos de capacidade suporte de carga poderia auxiliar no planejamento das atividades agrícolas, de maneira a evitar ou minimizar a degradação da estrutura das diferentes classes de solos.

Os objetivos deste trabalho foram quantificar a pressão de preconsolidação, sugerindo-a como indicador quantitativo da sustentabilidade estrutural dos solos cultivados com cana-de-açúcar; obter modelos matemáticos que permitam predizer o comportamento da estrutura dos solos cultivados com cana-de-açúcar em função da pressão de preconsolidação e do teor de água; obter os mapas de tráfego agrícola em função do teor de água e da pressão de preconsolidação do solo a partir de recursos geoestatísticos; e avaliar a resistência mecânica do solo à penetração, com base no índice de cone e na variação do teor de água nos diferentes tipos de solos.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Influência do tráfego agrícola na cultura da cana-de-açúcar

Atualmente a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das melhores opções dentre as fontes de energia renováveis, apresentando grande importância no cenário agrícola e econômico brasileiro e possui um futuro promissor no cenário mundial.

Como o Brasil é um dos mais tradicionais produtores de cana-de-açúcar e possui grande extensão territorial, a cana-de-açúcar é cultivada em vários tipos de solos que estão sob influência de diferentes climas, o que resulta em vários tipos de ambientes para a produção desta cultura (DIAS, 1997).

Vários fatores interferem na produção e maturação da cultura da cana-de-açúcar, sendo os principais a interação edafoclimática, o manejo da cultura e a cultivar escolhida (CESAR et al., 1987).

O solo é apenas um dos componentes de um conjunto complexo de fatores de produção, destacando-se pelo seu importante papel de fornecer às plantas suporte físico, água e nutrientes. Portanto, o conhecimento das características inerentes a cada solo, os chamados fatores edáficos, é importante para julgar o potencial de produção agrícola (LEPSCH, 1987).

A modernização da agricultura e a utilização mais intensa de máquinas agrícolas vêm provocando mudanças nos atributos físicos do solo. Diversas pesquisas, realizadas em várias regiões do país, revelam que estão ocorrendo alterações significativas nas

condições físicas de alguns solos, em virtude do tráfego contínuo de máquinas pesadas e do uso freqüente de equipamentos agrícolas em dias em que os níveis de água do solo são muito elevados (JORGE, 1983; TAYLOR & BRAR, 1991). Essas alterações referem-se ao decréscimo da porosidade, principalmente a macroporosidade ou porosidade de aeração, e da permeabilidade, ao aumento da compactação em relação às condições originais. Essas alterações, dependendo da intensidade, podem afetar o crescimento do sistema radicular das culturas, com reflexos negativos no rendimento das colheitas (FERNANDES & GALLOWAY, 1987).

Constataram Sparovek et al. (1997) que 31 % das terras da região de Piracicaba estão aptas para o corte mecanizado da cana-de-açúcar, sem queima prévia, das quais 76 % já estão ocupadas com cana-de-açúcar. Naquelas consideradas inaptas para o corte mecanizado encontraram-se 45,2 mil ha cultivados com cana-de-açúcar, o que representa 52 % da área ocupada com esta cultura.

De acordo com Magalhães (1990) a cana-de-açúcar é a cultura cujo solo está sujeito aos mais severos índices de compactação, em que os meios de transportes transitam com 25 toneladas de carga, em média, nas áreas de cultivo, com compressão média de 490 a 539 kPa, provocando compactação a uma profundidade de 35 a 40 cm, onde estão concentradas 70 a 80 % das raízes da cana planta ou das soqueiras.

Ainda hoje, na maioria das unidades produtoras o sistema de colheita adotado é o semi-mecanizado com queima prévia, mas este cenário está sendo alterado. Os produtores estão se ajustando ao sistema mecanizado com colhedoras autopropelidas, devido às pressões econômicas, energéticas e ambientais. Nesse sistema alguns estudos já foram realizados e verificou-se uma melhora na eficiência, redução dos custos de produção e dos impactos ambientais, viabilizando sua competitividade no mercado mundial (TANAKA, 2001). Com a adoção do sistema mecanizado de colheita de cana-de-açúcar, utilizando-se colhedoras autopropelidas, o tráfego de máquinas e implementos torna-se intenso e somando o uso inadequado de máquinas, veículos e equipamentos mais pesados, os seus efeitos podem ser sentidos ao longo de todo seu ciclo, abrangendo mais de cinco anos, conforme citação de Freitas (1987).

Este efeito foi demonstrado por Fernandes et al. (1983) que constataram queda de produção de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho com teor de água

no solo de 32 %, após uma, duas e três passadas de um caminhão com apenas um eixo e 16 t de massa. Os resultados mostraram que houve queda na produção de aproximadamente 10 t ha<sup>-1</sup> entre o nível máximo de compactação (três passadas) e a testemunha.

O solo sob cultivo de cana-de-açúcar é muito castigado pela intensa mecanização, que acaba sendo compactado demasiadamente e conseqüentemente levado à necessidade de agressivas práticas corretivas como cultivo ou preparo em profundidade, e ainda muitos solos acabam totalmente pulverizados, facilitando novas compactações (BARBIERI et al., 1985).

A disponibilidade de água no solo governa a produção vegetal, assim sua falta ou excesso afetam de maneira decisiva o desenvolvimento das plantas (REICHARDT, 1996a), pois alteram a absorção dos nutrientes e da própria água (HUMBRET, 1968). A cana-de-açúcar apresenta elevado consumo de água, necessitando de 250 partes de água para formar uma parte de matéria seca na planta (DILLEWIJN, 1952). Exceto em locais que utilizam irrigação para fornecimento de água às culturas, a disponibilidade de água é regida pela distribuição da chuva e pelo potencial de armazenamento de água no solo, que é condicionado pela sua capacidade de retenção e drenagem do solo. A capacidade de retenção de água de um solo é bastante variada dependendo do tipo e quantidade de porosidade do mesmo. Já a drenagem é função da porosidade e altura do lençol freático (MAULE et al., 2001).

Para Ripoli & Ripoli (2004) o controle de tráfego em cana-de-açúcar é definido como sendo a ação administrativa de comando do sistema de transporte de forma a mantê-lo nos limites especificados em sua programação operacional ou logística. Portanto, um sistema de controle de tráfego em cana-de-açúcar pode ser considerado como um conjunto estruturado de componentes que interagem de modo regular entre si e com o ambiente, satisfazendo certas restrições e tendo em vista determinados objetivos, de forma a operacionalizar a transferência de matéria-prima do campo para a indústria.

A missão de gerenciar esse sistema requer além de um planejamento operacional de máquinas consolidado, três requisitos básicos: ajustes para controle de pisoteio; estrutura de controle das atividades e recursos para tomada de decisão (RIPOLI & RIPOLI, 2004). 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.

A consecução desse objetivo tem sido levada a efeito por meio de vários caminhos: restrição do tráfego nas entrefileiras de forma a possibilitar espaço de solo fisicamente propício ao sistema radicular: uso de rodados menos agressivos em termos de cargas concentradas; traçado de carregadores terciários que possibilitem a saída de veículos transbordadores com o mínimo de percurso no talhão (RIPOLI & RIPOLI, 2004).

A restrição do tráfego nas entrefileiras demonstra garantir benefícios de longo prazo no cultivo da cana-de-açúcar, segundo pesquisa conduzida na Austrália, por McGarry et al. (1996). Sobre uso de rodados menos agressivos, são inúmeros os autores que tratam do assunto, destaca-se o de Braunack et al. (1998), que estudaram, por meio da medida do índice de cone no rasto dos rodados, o efeito do tráfego de veículos de transporte canavieiro equipados com pneus duplos comparativamente aos equipados com pneus simples de baixa pressão (alta flutuação). Concluíram que, para as condições estudadas, o efeito dos pneus de baixa pressão e banda de rodagem larga foi menos agressivos que a rodagem dupla convencional dos veículos de transporte.

O ajuste horizontal refere-se à distribuição das cargas verticais sobre a superfície do terreno cultivado com cana-de-açúcar. Seu objetivo é a harmonização das bitolas das máquinas e veículos com o espaçamento da cultura, de forma a reduzir o nível das tensões no solo circunvizinho do sistema radicular e das gemas latentes na soqueira de cana (RIPOLI & RIPOLI, 2004).

O ajuste direcional, como o próprio nome indica, trata da orientação dos percursos de deslocamento do veículo sobre a área cultivada. Seu objetivo é direcionar o percurso das máquinas e veículos nos terrenos cultivados de forma que eles não atinjam as plantas. Este ajuste, atualmente, pode ser realizado por meio do uso de sistemas de

direcionamento via satélite, que por sua vez utilizam algum GPS (Sistema de Posicionamento Global) submétrico. Neste caso, o mapa da área de tráfego conteria a posição georeferenciada das fileiras de cana e o motorista/tratorista seria alertado pelo sistema GPS toda vez que o rodado atingisse as fileiras das soqueiras, Ripoli & Ripoli (2004). Segundo os autores, em um futuro não muito distante, o produtor poderá tomar o ajuste direcional como uma prática economicamente viável nos sistemas de transporte canavieiro.

#### **4.2 Influência do tráfego e de outros fatores sobre a estrutura do solo**

Uma das limitações para que o desenvolvimento sustentável seja atingido está relacionado com a questão do tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas durante a realização de colheita e transporte da cana-de-açúcar. Este tráfego pode causar degradação da estrutura do solo em função, muitas vezes, devido ao excesso de teor de água ou da baixa capacidade de suporte de carga do solo no momento de realização das operações agrícolas. O tráfego indiscriminado sobre o talhão cultivado com a cultura da cana-de-açúcar tem sido preocupante, pois provoca um incremento na compactação superficial e subsuperficial, associado à redução na produtividade (FERNANDES & GALLOWAY, 1987).

Conhecer os atributos físicos de um solo é extremamente importante para poder manejá-lo corretamente e usá-lo com eficiência. Busca-se na agricultura moderna o desenvolvimento sustentável, que objetiva uma produtividade econômica sem degradar o ambiente. Uma exploração agrícola sustentável requer, entre outros fatores, a manutenção e/ou melhoria da qualidade do solo, porém, a intensificação da exploração agrícola aliada ao uso e ao manejo inadequado do solo tem provocado modificações negativas nas propriedades físicas do solo (SOUZA et al., 2004 e STONE & SILVEIRA, 2001) aumentando sua erosão e reduzindo a produtividade das culturas (SCHAEFER et al., 2002).

Segundo 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 um teor de água elevado, inadequado para as atividades agrícolas.

Com a modernização da agricultura, o peso das máquinas e equipamentos e a intensidade de uso do solo têm aumentado. Esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo. Aliado a isso, ocorreu a adoção do sistema conservacionista de preparo do solo, onde o solo deixou de ser revolvido e a compactação presente deixou de ser aliviada pelo preparo nos cultivos sucessivos (STRECK, 2004).

O uso intensivo de máquinas e implementos na agricultura moderna pode modificar as propriedades do solo, em relação às aquelas de seu estado natural. Têm sido detectadas camadas compactadas subsuperficiais causadas pelo intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que provocam pressões na superfície do solo (MANTOVANI, 1987), afetando a sua densidade (MORAES & BENEZ, 1996), degradando a macroestrutura e reduzindo o índice de flocculação da argila do solo (PRADO & CENTURION, 2001). Nas últimas três décadas, houve um aumento na intensidade de uso do solo e da mecanização, principalmente com as operações de aração e gradagem, com conseqüente degradação da estrutura original do solo. As ações dos elementos ativos dos equipamentos de preparo de solo causam modificações, seja pulverizando as camadas superficiais ou promovendo a compactação mecânica das camadas subsuperficiais (ASSIS, 2002).

A chave da sustentabilidade dos solos tem sido a matéria orgânica, devido as influências benéficas nas mais variadas propriedades físicas e químicas que ela apresenta. A degradação de um material orgânico depende do tipo, qualidade e quantidade adicionada ao solo, os quais poderão modificar a estrutura, capacidade de retenção de água, consistência, massa específica, porosidade, aeração e condutividade elétrica desse solo (FIGUEIREDO et al., 2000). A adição de material orgânico promove a formação e estabilização dos agregados constituintes do solo melhorando a sua estrutura, por meio das condições de aeração e aumento da capacidade de infiltração e retenção de água (TIMM, 2002).

Em relação à física do solo, em solos com maior cobertura vegetal ocorre maior capacidade de retenção de água, proporcionando maior manutenção no teor de



água no solo, responsável por grande parte das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (ORLANDO FILHO et al., 1998). Para Dias Junior (1994) e Dias Junior & Pierce (1996), é de suma importância determinar o teor de água e a capacidade de suporte de carga dos solos, para que os danos à sua estrutura possam ser evitados. A compactação do solo é um processo que leva ao aumento de sua resistência, redução da porosidade, da continuidade de poros, da permeabilidade e da disponibilidade de nutrientes e água. Esse processo afeta o crescimento e o desenvolvimento radicular, aumenta a densidade do solo, as perdas de N por desnitrificação, o consumo de combustível das máquinas no preparo dos solos compactados e aumenta a erosão do solo pela menor infiltração de água (SOANE & OUWERKERK, 1994).

O conteúdo de água no momento em que o solo está sendo compactado tem uma grande influência na redução e redistribuição do espaço poroso. Solos secos são mais resistentes a mudanças na distribuição do tamanho dos poros e essa resistência é reduzida com o aumento do conteúdo de água. Se o teor de água aumenta, a resistência à compactação diminui devido à maior lubrificação das partículas, até que se atinjam os limites plásticos inferiores e o conteúdo de água de aração ótimo, onde o pico de compactação ocorre. Acima do conteúdo de água na capacidade de campo, próximo do ponto de saturação de cada tipo de solo, o aumento do teor de água resulta em uma redução da densidade, chegando a causar a destruição da estrutura do solo (SILVA, 1984).

No cultivo contínuo, a gradagem para o preparo do solo e o uso freqüente de cultivadores e subsoladores, na maioria das vezes, não são realizados nas condições ideais de teor de água. Essas ações provocam diversas alterações nas propriedades físicas, resultando em uma degradação da estrutura do solo, principalmente em relação à distribuição do tamanho de agregados estáveis em água (DA ROS et al., 1997). Ao longo do tempo, o cultivo contínuo do solo diminui a porosidade total, aumenta a densidade do solo e reduz a taxa de infiltração e, conseqüentemente, diminui também a rentabilidade, em decorrência do crescente aumento dos custos de produção. A condutividade hidráulica do solo diminui com o aumento da sua densidade, assim como a taxa de infiltração em solos compactados, causando aeração deficiente e aumento do escoamento superficial de água. Tal comportamento é capaz de acelerar o carreamento de partículas do solo juntamente com fertilizantes e defensivos agrícolas (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

Pesquisas realizadas em várias regiões do Brasil apontam alterações significativas nas propriedades físicas de alguns solos, em virtude do tráfego contínuo de máquinas pesadas, do não revolvimento do solo e do uso freqüente de equipamentos agrícolas em períodos onde o teor de água no solo é muito elevado. Essas alterações referem-se ao decréscimo da porosidade e da permeabilidade e ao aumento da compactação em relação às condições originais (NOVAK et al., 1992). Segundo Tavares Filho et al. (1999) a estrutura do solo é modificada em função da compactação, sendo que os macroagregados são destruídos e o solo apresenta estrutura degradada, podendo impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

A intensidade do tráfego de máquinas condiciona a resposta do solo à compressão, ou seja, determina o grau de alteração das propriedades físicas do solo (CULLEY & LARSON, 1987; GYSI, 2001; SOANE et al., 1982). Em um ano agrícola, a freqüência comum de quinze passadas de trator para a realização de operações, como adubações e pulverizações, pode intensificar ainda mais a degradação da estrutura do solo (STOLF, 1987; TERSI & ROSA, 1995).

De acordo com Silva et al. (2000b) o tráfego de máquinas pesadas provoca compactação superficial, assim como reduz a produtividade das culturas (BEUTLER & CENTURION, 2003). Segundo Queiroz-Voltan et al. (2000), em solos compactados as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado. Para estes autores, a quantidade de oxigênio pode ser limitante nos processos metabólicos. Hakansson & Voorhees (1997) afirmaram que em solos compactados, o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes. Segundo Pabin et al. (1998) a redução de 40 % no comprimento radicular é crítica à produtividade das plantas em solo arenoso. Cintra & Mielniczuk (1983) verificaram uma redução de 50 % no comprimento radicular de várias culturas na resistência mecânica do solo à penetração de 1,10 MPa, em Latossolo Vermelho. Em geral tem se adotado o valor de resistência mecânica do solo à penetração de 2,0 MPa como crítico ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998).

As mobilizações intensivas do solo, no sistema convencional, sob condições inadequadas de teor de água e de cobertura vegetal, modificam adversamente a

estrutura do solo, afetando basicamente as relações entre as fases: sólida, líquida e gasosa. Desta forma, transformam a camada arável em: a superficial pulverizada e a subsuperficial compactada (DERNADIN & KOCHHANN, 1993).

Os pneus usualmente utilizados nos tratores e colhedoras comercializadas no Brasil possuem a sua parte lateral rígida, sendo chamados de pneus de banda diagonal. Essa rigidez impede que o pneu se molde no solo de acordo com as irregularidades do terreno e, por isso, a sua área de contato fica reduzida, aumentando a pressão na superfície do solo (SILVA et al., 2000a). Segundo Flowers & Lal (1998) a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita. Horn et al. (1995) acrescentam que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento.

Em estudo realizado por Barbosa et al. (2005) sob um Argissolo Vermelho-Amarelo, observaram diferenças significativas a favor do pneu radial, quando comparado ao pneu diagonal, para os parâmetros força de tração e potência na barra.

O uso intensivo dos Latossolos Vermelho Eutroférico com plantio de cana-de-açúcar, com preparo superficial excessivo e queima de resíduos, modifica significativamente as propriedades físicas do solo. As principais alterações são evidenciadas pela diminuição do volume de macroporos, do tamanho de agregados, da taxa de infiltração de água no solo e pelo aumento da resistência à penetração de raízes e da densidade do solo (ALBUQUERQUE et al., 1995; CAVENAGE et al. 1999; KLEIN & BOLLER, 1995; UTSET & CID, 2001). O comportamento do solo quanto à porosidade é um reflexo de diversos fatores inter-relacionados, como por exemplo, a ação de máquinas agrícolas, que exerce pressão sobre o solo causando alterações.

Estudos realizados por Streck et al. (2004) utilizando-se de uma carregadora com pneus radiais em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, observaram que em diversas passadas houve o cisalhamento do solo quando este apresentava um teor de água superior ao estado friável (teor de água gravimétrica na faixa de 15 %).

Segundo Salire et al. (1994) a compactação abaixo da camada arável é função da carga total por eixo e compactação em superfície é função da pressão de inflação dos pneus. Em um Latossolo Vermelho e um Argissolo Vermelho trafegado por trator com

diferentes pressões de inflação nos pneus, Boeni (2000) encontrou redução da porosidade total e aumento da microporosidade com aumento da pressão de inflação nos pneus para o primeiro solo, e aumento da microporosidade com redução da macroporosidade sem diferença para pressão de inflação no segundo solo. Estudando um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, Streck et al. (2004) evidenciaram o efeito do confinamento da pressão aplicada na superfície do solo pelo tráfego de máquinas em duas vezes, em função de uma camada compactada pré-existente localizada entre 8 e 15 cm.

Numa área total de 70.000 ha de cultura de cana-de-açúcar sob Latossolo Vermelho, não foram encontradas áreas com densidades de solo superiores a  $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ . Existe uma tendência de as raízes desenvolvidas em solos mais compactados apresentarem a relação CO/CV (espessura do córtex / espessura do cilindro vascular) mais elevada. Nos níveis de densidades estudados, foram observadas alterações histológicas significativas nas raízes (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

Em um Argissolo textura arenosa/média Dias (1997) verificou um maior potencial produtividade agrícola em relação aos demais e atribuiu a vantagem produtiva desse solo à associação das características físicas que permitiram um bom armazenamento de água e às boas condições químicas. O fato de existir boa disponibilidade de água permite um bom aproveitamento dos nutrientes existentes no perfil do solo (MAULE et al., 2001).

Estudos realizados por Kunz et al. (2003), em um Latossolo Vermelho, observaram que devido às flutuações de teor de água e resistência mecânica do solo à penetração as raízes das plantas tiveram seu crescimento restringido. Nos tratamentos que receberam compactação adicional o crescimento radicular foi menos vigoroso e se concentrou nas camadas superficiais e com indícios claros de deformação. Nos tratamentos que não receberam compactação adicional as raízes atingiram maiores profundidades e tiveram um melhor desenvolvimento e distribuição no solo. Kunz et al. (2003) também observaram que o estado de compactação imposta por quatro passadas de máquinas reduziu em 17 % a produtividade da cultura estudada.

A falta de dados precisos sobre as alterações físicas dos solos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar, tem dificultado a identificação de fatores responsáveis pelo decréscimo da produtividade, bem como a implantação de práticas mais adequadas à manutenção das condições agrícolas (MAIA & RIBEIRO, 2004).

Continuamente, o acúmulo de pressões provocadas pelo tráfego de máquinas agrícolas ou pisoteio animal sobre o solo leva a uma variabilidade espacial do estado de compactação, principalmente nas áreas ditas de “cabeceira”, onde o tráfego de máquinas é mais intenso (SILVA et al., 2004).

### **4.3 Variabilidade espacial**

Desde o começo da década de 90, iniciou-se o desenvolvimento de tecnologias e princípios para manejar a variabilidade espacial e temporal associada com os aspectos da produção agrícola, para melhorar os rendimentos e preservar a qualidade ambiental (PIERCE & NOWAK, 1999). Se deve conhecer a variabilidade e esta ser de suficiente magnitude para que um manejo diferenciado por talhões resulte em um benefício frente ao manejo uniforme. O rendimento dos cultivos varia espacialmente. Determinar quando e onde as variações nas propriedades do solo causam variações nos rendimentos é o desafio que enfrenta a agricultura de precisão (MULLA & SCHEPERS, 1997). A variabilidade espacial pode ser estudada por meio de técnicas de geoestatística que permitem elaborar mapas e delimitar áreas de manejo diferencial.

Nas últimas décadas, a agricultura passou por muitas transformações em função das novas tecnologias existentes, que visam o controle mais eficaz dos fatores de produção, tendo a preocupação com o ambiente e a necessidade de otimizar a utilização das áreas produtivas existentes. A agricultura atual vem tratando extensas áreas como sendo homogêneas em seus vários atributos físicos. O conhecimento da variação no tempo e no espaço dos atributos e à escolha de técnicas mais adequadas à região, contemplando áreas menores e levando em consideração a variabilidade espacial, permite uma agricultura mais tecnificada e ecologicamente correta. Pesquisadores da área de solos se preocupam com o problema de variação espacial e temporal dos solos desde o começo do século. Mas, somente nas décadas de 50 e 60, com o avanço na teoria de estatística espacial é que os cientistas começaram a perceber a potencialidade deste instrumento para o manuseio de dados quantitativos, facilitando a compreensão da variabilidade do solo (BURROUGH et al., 1997).

O gerenciamento do processo de produção em função da variabilidade é o que se convencionou chamar agricultura de precisão. Seu objetivo é correlacionar causas e efeitos a partir de séries históricas de dados e de sua distribuição espacial. Mantovani (2000) definiu o termo agricultura de precisão como sendo o uso de tecnologias atuais para o manejo de solo, insumos e culturas, de modo adequado às variações espaciais e temporais em fatores que afetam a produtividade dessas culturas. Essa nova filosofia de se fazer agricultura tem levado ao uso de três tecnologias, que são o SR (Sensoriamento Remoto), o SIG (Sistemas de Informações Geográficas) e o GPS (*Global Position System*). Stanfford (1996) definiu agricultura de precisão como um conjunto de técnicas que pressupõem o gerenciamento localizado da cultura. De uma forma ou de outra, a agricultura de precisão visa o gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo, não somente das aplicações dos insumos ou de mapeamentos diversos, mas de todos os processos envolvidos na produção.

Agricultura de precisão é um conceito relativamente recente de manejo do sistema solo-planta-atmosfera, baseado em princípios de gerenciamento agrícola de informações sobre as variabilidades (espacial e temporal) dos fatores de produção e da própria produtividade. A adoção desta nova tecnologia justifica-se pelo fato da maioria dos produtores agrícolas considerarem o solo uniforme para cada área de cultivo. Porém, cada área pode ter consideráveis variações em seus atributos, tais como: variabilidade espacial do tipo de solo, da produtividade, das características físicas e da necessidade de nutrientes. Para estudar a variabilidade espacial desses atributos, utilizam-se técnicas como a geoestatística, baseada na “teoria das variáveis regionalizadas”, como explicou Mercante et al. (2003). Estudos realizados na Austrália mostraram que ao longo de cinco anos (período médio no qual o canavial é reformando) a introdução da agricultura de precisão (mapeamento de produtividade, amostragem de solos e aplicação de gesso em taxas variáveis) trouxe uma economia aproximada de US\$ 563 ha<sup>-1</sup> (COX & WARDLAW 1999).

A variabilidade espacial das propriedades do solo pode influenciar a eficiência do manejo e, conseqüentemente, o desenvolvimento da cultura, o que pode alterar as respostas dos tratamentos aplicados em pesquisa agrícola, mesmo em parcelas pequenas. A maioria dos experimentos de manejo do solo ainda considera distribuição completamente ao

acaso no campo e as parcelas experimentais uniformes quanto aos parâmetros estudados (GREGO & VIEIRA, 2003).

No nordeste do Estado de São Paulo, empresas agrícolas mapearam grandes áreas de seus solos, em diversos níveis de detalhamento, para o entendimento da necessidade de manejo mais adequado das culturas, notadamente a cana-de-açúcar. Entretanto, em áreas de solos desenvolvidos de basalto os mapas apresentam uma única cor, indicando baixa variabilidade da ocorrência de classe de solos e, conseqüentemente, homogeneidade dos seus atributos físicos. Nesse caso, poucas alterações nas práticas de manejo são recomendadas para essas áreas. Todavia, estudos regionais mais detalhados, utilizando modelos de paisagem e geoestatística (MARQUES JÚNIOR & LEPSCH, 2000; POCAI, 2000 e SOUZA, 2001), têm demonstrado que, em áreas antes consideradas homogêneas, sob uma única classe de solo, existe dependência espacial de atributos granulométricos a curtas distâncias em grau suficiente para interferir na produtividade das culturas. Hall & Olson (1991) mencionaram a importância da classificação dos solos como auxiliar ao manejo das culturas, porém, ressaltaram que o registro das relações do solo com a paisagem como causa das variações de propriedades tem sido ignorado. Nesse sentido, os mapeamentos da variabilidade espacial de atributos granulométricos nessas áreas representam um esforço importante para o manejo de aplicação de insumos com taxas variadas e racionalização das atividades agrícolas.

A variabilidade espacial não ocorre ao acaso. Partindo deste pressuposto, ferramentas geoestatísticas devem ser utilizadas. Estes métodos foram originalmente desenvolvidos e aplicados em mineração, mas passaram a ser usados para uma análise e descrição detalhada da variabilidade das propriedades do solo (CARVALHO et al., 2002; VIEIRA, 2000). Neste sentido, a teoria das variáveis regionalizadas apresenta-se como importante ferramenta para análise da estrutura da dependência espacial das variáveis, indicando o número e a distribuição de amostras a serem coletadas, sem prejuízo para a representatividade, possibilitando maior detalhamento da área (VENDRUSCULO, 2002).

O estudo da variabilidade espacial de atributos do solo é particularmente importante em áreas sob diferentes manejos (SOUZA et al., 2001). A análise geoestatística pode indicar alternativas de manejo, não só para estudar os efeitos da variabilidade espacial sobre a produção das culturas, como também para estimar respostas das plantas a determinadas práticas de manejo. A ação do sistema de manejo do solo e o sistema

de tráfego não são uniformes em toda a área, por isso, torna-se importante analisar a distribuição espacial das variáveis em estudo (SILVA et al. 2004).

A geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. O estudo da variabilidade espacial pode ser feito em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solos (BERG & KLAMT, 1997; COUTO et al., 2000), com também em áreas menores (ALBUQUERQUE et al., 1996; BERTOLANI & VIEIRA, 2001; OLIVEIRA et al., 1999; SOUZA et al., 1998).

Para avaliar se há dependência espacial entre as amostras utiliza-se o variograma. Segundo Vieira (2000) o variograma é uma ferramenta utilizada para medir e descrever a dependência espacial e expressa o grau de semelhança entre o ponto e os seus vizinhos. O variograma nada mais é do que um gráfico que representa a estimativa das variâncias dos dados ( $\gamma(h)$ ) em relação ao vetor correspondente que os separa ( $h$ ). As observações realizadas em distâncias menores são mais similares do que aquelas tomadas à distâncias maiores. Isaaks & Srivastava (1989) e Vieira (1995) relataram sobre os componentes principais do variograma. A variância espacial decresce na medida em que a distância entre os pontos amostrais ( $h$ ) decresce. Assim, se as variâncias são menores, há uma maior semelhança entre os dados amostrados. A variância cresce em função de  $h$  até o ponto onde não se observa mais a continuidade espacial. Este ponto no eixo  $h$  é chamado de alcance do variograma ( $a$ ) e no eixo  $\gamma(h)$  é chamado de patamar ( $C + C_0$ ). Na medida em que  $h$  tende para zero, a variância ( $\gamma(h)$ ) tende para um valor positivo chamado efeito pepita ( $C_0$ ). O efeito pepita engloba a variação em escala menor que a amostrada e/ou os erros ocorridos, representando a aleatoriedade das medições. O componente estrutural ( $C$ ) é a porção da variação que é explicada pela continuidade espacial.

Em sistemas de cultivos altamente tecnificados, como em cana-de-açúcar, é fundamental ter o conhecimento da variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo, o que poderá contribuir para redução de custos nos sistemas de produção (ALBUQUERQUE et al., 1996). Estudando a variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar, Souza et al. (2004) observaram que apesar de os latossolos serem considerados homogêneos, apresentaram variabilidade diferenciada para os atributos granulométricos.



Amostragens para atributos químicos e granulométricos do solo estudadas por Vieira (1997) apresentaram maior dependência espacial na camada de 0-25 cm do que na de 25-50 cm, provavelmente por ser a região de maior alteração com cultivo. A variabilidade encontrada na área de 30 m por 30 m foi suficiente para mostrar que amostragem ao acaso provavelmente esconderia a realidade (GREGO & VIEIRA, 2003).

A variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversas propriedades do solo, inclusive da resistência mecânica do solo à penetração, é dependente de fatores de formação do solo e fatores relacionados com o manejo do solo (SOUZA et al., 2001). Grego & Viera (2003) afirmaram que a amostragem ao acaso para resistência mecânica do solo à penetração, teor de água e densidade do solo a 0-25 cm seria falha, pois esconderia a variabilidade encontrada.

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. Em estudo realizado por Utset & Cid (2001) foram observados comportamentos distintos da variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em condições de solo seco e de solo úmido. De acordo com Silva et al. (2004), 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. Os variogramas ajustados para as profundidades de 12,5 cm até 25 cm apresentaram estacionaridade e alcance em torno de 3 metros. Para Abreu (2000) a resistência mecânica do solo à penetração apresentou ausência total de dependência espacial na camada de maior estado de compactação, que se estendia da profundidade de 7,5 cm a 17,5 cm.

Analisando a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, Souza et al. (2001) ajustaram um variograma do tipo esférico para a resistência mecânica do solo à penetração na profundidade de 0-5 cm, com alcance de 41,6 m e modelo exponencial na profundidade de 15-20 cm, com alcance de 58,8 m, ambos apresentando moderada dependência espacial. Para visualizar a distribuição dos valores de resistência mecânica do solo à penetração nos locais estudados, realizou-se a krigagem dos dados e gerando mapas de superfície.

Segundo Silva et al. (2004) o tráfego de máquinas, principalmente em lavouras sob plantio direto, provoca diferentes estados de compactação do solo e que o maior estado de compactação ocorre na extremidade da lavoura. Estes resultados foram observados a partir dos mapas de resistência mecânica do solo à penetração estimados pela krigagem.

Com o desenvolvimento da agricultura de precisão, o conhecimento da distribuição espacial de variáveis de solo e planta tornou-se indispensável para o planejamento e otimização de adubações, tratos culturais e colheita. Portanto, o estudo da variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas dos solos é importante em áreas com diferentes manejos, pois pode indicar alternativas de manejo de solo para reduzir os efeitos da variabilidade horizontal e vertical do solo. Essa variabilidade, em muitos casos, pode influenciar a interpretação de efeitos de tratamentos em experimentos (SILVA et al., 2003).

#### **4.4 Avaliação da resistência mecânica do solo**

##### **4.4.1 Compressibilidade do solo**

A redução na produtividade das culturas agrícolas devido à compactação pode atingir valores alarmantes dependendo do teor de água no solo e das máquinas e veículos que efetuam as operações agrícolas. A pressão de preconsolidação indica assim uma variação da capacidade de suporte de carga dos solos em função das variações do teor de água (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996; KONDO, 1998) devendo-se em uma agricultura sustentável evitar a aplicação de pressões superiores à pressão de preconsolidação (LEBERT & HORN, 1991).

Em condições de campo a energia de compactação aplicada pelos rodados das máquinas agrícolas dificilmente irá atingir os níveis de 560 kPa, adotados no teste de Proctor Normal (1936). Håkansson & Voorhees (1990) utilizaram 200 kPa como valor médio de energia imposta pelas máquinas agrícolas a superfície do solo. A utilização do teste de compactação como energia menor reduz obviamente a densidade máxima, obedecendo no entanto, a mesma saturação relativa que a do teste de Proctor Normal, ocorrendo com isto um aumento no teor de água ótimo de compactação, em função da maior porosidade

A compactação dos solos agrícolas é resultante do somatório de vários fatores relativos às máquinas: tipo, largura e pressão de inflação dos pneus; massa e carga por eixo; e teor de água no solo e estado inicial da compactação. Estes fatores influenciam as propriedades físicas e biológicas do solo e suas relações com o crescimento e produtividade das plantas (SILVA et al., 2000a).

Inúmeros autores sugerem que a compactação do solo seja identificada por meio de atributos do solo, como a densidade do solo, distribuição de poros por tamanho, estabilidade de agregados em água e pela resistência mecânica do solo à penetração (com a finalidade de verificar a existência de camadas de maior resistência e o potencial para o desenvolvimento das raízes). Estes tradicionais atributos apenas identificam as camadas compactadas sem, entretanto, quantificar a capacidade de suporte de carga dos solos. A CSCS (Capacidade de Suporte de Carga dos Solos) pode ser usada como um indicativo das pressões que as raízes precisam fazer para se desenvolverem (ASSIS, 2002; DIAS JUNIOR, 1999; GERALDO, 2002; MIRANDA, 2001 e SILVA, 2002).

A compactação em solos devido ao tráfego de máquinas nas diferentes operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita é constatada em diversos trabalhos (DIAS JUNIOR et al., 1999; FLOWERS & LAL, 1998; TORMENA & ROLOFF, 1996, e SILVA et al., 2000b). O comportamento do solo, devido à aplicação de carga na superfície, depende das características do rodado e das propriedades físicas do solo. Forças verticais (carga sobre as rodas) e forças horizontais (devido ao movimento das rodas) são transmitidas pelo rodado ao solo. A pressão de inflação e o tamanho do rodado controlam a distribuição das forças sobre a área de contato com o solo, que é também influenciada pela sua capacidade de suporte de carga. As forças na interface pneu-solo e a capacidade de suporte de carga do solo controlam a magnitude e a distribuição das tensões no solo sob as rodas (SOANE et al., 1981). 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, alinhando com Barbosa et al., 2005. Uma carreta agrícola com peso de 300 kN, pressão de contato pneu-solo de 100 kPa, pneus largos com baixa pressão de inflação e montagem de rodas em eixos duplos ou triplos não causam compactação excessiva na camada superficial.

O uso de pneus radiais com pressão baixa e calibrado 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 & UPADHYAYA, 1997).

O trabalho com máquinas em um solo que se encontra com um teor de água excessivo, leva a adesão do solo nos rodados, dificulta as operações de preparo, tratos culturais e colheita e causa alta patinagem dos tratores com uma baixa eficiência de tração. Para adequar o patinamento a limites aceitáveis e para que possa ser desenvolvida uma velocidade operacional adequada, tem sido utilizados tratores de grande potência e peso. Grande parte dessa potência do trator pode estar sendo desperdiçada pela patinagem, além do aumento de peso contribuir para a deformação do solo. Além dos efeitos negativos do preparo do solo, quando na operação de colheita, as colhedoras trafegam com elevada carga, contribuindo para que uma compactação adicional ocorra (MANTOVANI, 1987).

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 (HÅKANSSON & REEDER, 1994).

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 (TORMENA & ROLLOF, 1996).

Alternativas para minimizar o efeito do tráfego vêm sendo buscadas por diversos autores. Para Magalhães (1990) e Al-adawi & Reeder (1996), o controle do tráfego é uma alternativa que parece estar passando das pesquisas para tornar-se acessível aos agricultores. O controle do tráfego consiste em um sistema de produção no qual a área reservada para produção e as linhas destinadas ao tráfego de veículos são distintas e

permanentemente separadas. Desta forma, a separação das zonas de tráfego das linhas cultivadas promove a minimização da compactação nas áreas cultivadas.

O estudo da compactação do solo em áreas agrícolas envolvendo parâmetros físico-mecânicos (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999a e SILVA, 2002), tem assumido grande importância devido à possibilidade de avaliar conjuntamente a suscetibilidade do solo, a compactação e o momento ideal para execução das operações mecanizadas.

Para o manejo do solo, o teor de água em que este se encontra é muito importante. A faixa de teor de água do solo na qual se deve trabalhar é a de friabilidade (DALLA ROSA, 1981 e SILVEIRA, 1989), pois se este estiver muito seco apresenta alta coesão, exigindo maior potência das máquinas agrícolas e maior número de operações para obter um leito de semeadura adequado em função da excessiva formação de torrões. Por outro lado, se o solo estiver muito úmido, além de problemas de sustentação e capacidade de tração dos tratores, ocorrerão danos à estrutura, pois filmes de água estarão dispostos ao redor das partículas, funcionando como lubrificante, favorecendo a desagregação pela pressão exercida pelas máquinas e implementos agrícolas, compactando-o.

O teor de água ótimo de compactação está a 90 % do limite plástico, dentro da faixa de friabilidade do solo (FIGUEIREDO et al., 1998). É nessa condição de solo friável que se recomenda à realização das operações motomecanizadas em função da mínima coesão entre partículas do solo e da menor adesão do solo às ferramentas de preparo e semeadura (ASHBURNER & SIMS, 1984).

Segundo Dias Junior & Pierce (1996) condições climáticas extremas durante operações motomecanizadas, juntamente com mudanças para o sistema de preparo conservacionista do solo, têm renovado a preocupação com o processo de sua compactação. Apesar de vários pesquisadores (GROHMANN & QUEIROZ NETO, 1966; HILLEL, 1982; LEBERT et al., 1989; LEBERT & HORN, 1991; WARKENTIN, 1971; SILVA et al., 1986 e SMUCKER & ERICKSON, 1989) terem quantificado os efeitos do manejo nas propriedades físicas do solo, existe uma carência de estudos que quantifiquem os níveis de pressões que podem ser aplicadas aos solos, sem que haja degradação da estrutura.

O efeito da resistência mecânica e o do teor de água do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos foram estimados por Kondo & Dias Junior (1999c).

Concluíram que na medida em que o teor de água do solo aumenta, as retas de compressão virgem são deslocadas para a região de menor pressão, indicando o aumento da suscetibilidade do solo à compactação, diminuindo, entretanto, a resistência mecânica a ser vencida pelo sistema radicular das culturas.

A necessidade de determinar o teor de água do solo antes que este seja trafegado ou cultivado é realçada por Kondo (1998), bem como uma previsão quantitativa do prejuízo causado à sua estrutura, caso as pressões aplicadas excedam a capacidade de suporte de carga desse solo.

O teor de água é o 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 (DIAS JUNIOR, 1994). Entretanto, em condições de alto teor de água o solo fica suscetível à compactação devido a sua baixa capacidade de suporte de carga.

Com a implementação de legislação específica exigiu-se que as empresas envolvidas com a exploração de recursos naturais adaptassem suas atividades de maneira condizente ao desenvolvimento sustentável (DIAS JUNIOR et al., 1999), evitando assim a degradação de suas áreas. Assim, o desenvolvimento de um modelo que indique a máxima pressão suportável pelo solo para diferentes teores de água sem causar compactação adicional é de grande valor na agricultura, principalmente naquela com maior emprego de mecanização. Este modelo fornecerá informações de quando, em relação ao teor de água, um solo pode ser cultivado sem sofrer compactação, ou seja, sem sofrer degradação estrutural (DIAS JUNIOR, 1994).

Um dos parâmetros indicados na estimativa da capacidade de suporte de carga tem sido a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) (DIAS JUNIOR et al., 1999; DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995; KONDO, 1998; RUBIN et al., 1998 e SILVA & RIBEIRO, 1998). A  $\sigma_p$  é obtida a partir das curvas de compressão do solo, por meio da utilização do método gráfico proposta por Casagrande (1936), ou utilizando-se da planilha eletrônica proposta por Dias Junior & Pierce (1995). A proposição do método de Casagrande é baseada na escolha visual do ponto de menor raio ou de máxima curvatura da curva de compressão do solo (Figura 1). Observações verificadas em alguns trabalhos relatam que na medida em que

aumentam as perturbações na amostra indeformada (HOLTZ & KOVACS, 1981), ou em condição de alto teor de água (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995) torna-se difícil a escolha do ponto de menor curvatura, em razão das curvas de compressão tenderem a ficarem lineares, apresentando grande subjetividade. Já o método baseado na planilha eletrônica proposta por Dias Junior & Pierce (1995) reduz a probabilidade de erro durante a determinação, apresentando confiabilidade, repetibilidade e facilidade de utilização.

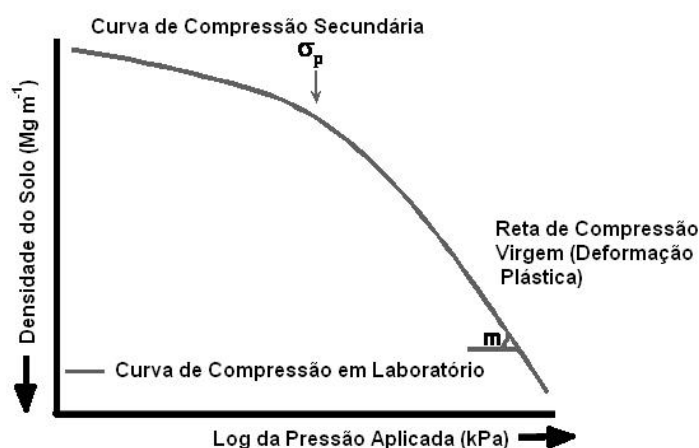


Figura 1. Curva de compressão do solo mostrando a curva de compressão secundária, reta de compressão virgem com suas regiões de deformações elásticas e plásticas, respectivamente, a posição da pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), e o índice de compressão ( $m$ ).

A pressão de pré-consolidação divide a curva de compressão em duas regiões, sendo uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária), e em uma outra região onde ocorre a deformação plástica e não recuperáveis (reta de compressão virgem) (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995 e HOLTZ & KOVACS, 1981).

A história de tensão do solo reflete o tipo de manejo utilizado (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996) e tem sido quantificada pela pressão de pré-consolidação, determinada nas curvas de compressão do solo. Dessa forma, os entendimentos do comportamento compressivos do solo utilizando as curvas de compressão adquirem uma grande relevância, visto serem elas a base, do ponto de vista físico, para a escolha do manejo

mais adequado, reduzindo-se os efeitos prejudiciais oriundos do processo de compactação do solo.

Na situação em que o solo não sofreu nenhuma pressão prévia, sua curva de compressão é linear e qualquer pressão aplicada resultará em deformações não recuperáveis (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996). Em situações em que o solo já experimentou pressões prévias, ou seja, já tenha uma história de tensão, as deformações resultantes poderão ser recuperáveis ou não recuperáveis (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996; HOLTZ & KOVACS, 1981 e STONE & LARSON, 1980).

É na região da curva de compressão secundária, conforme Dias Junior & Pierce (1996), que o solo deve ser cultivado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional. É este o componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo e que vem sendo usado na modelagem da capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994) e Kondo & Dias Junior (1999a). Assim, a maior pressão que deve ser aplicado ao solo para evitar a sua compactação é a pressão de preconsolidação (DIAS JUNIOR, 1994).

O modelo proposto por Dias Junior (1994) tem sido utilizado para quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar que ocorra compactação adicional em diferentes sistemas de manejo e culturas, entre os quais solos sob culturas anuais e pastagem (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999a), eucalipto (DIAS JUNIOR et al., 1999), café (MIRANDA, 2001), sistemas de manejo no cerrado (OLIVEIRA, 2002; SILVA, 2002) e para determinação de dias trabalháveis (CASTRO NETO, 2001).

Indicam Silva et al. (2000a) que a amplitude das deformações depende do tipo de solo, do estado inicial de compactação, teor de água e pressão aplicada. Os mesmos autores concluíram ainda que a suscetibilidade à compactação depende do teor de água, sendo este efeito diferente para cada tipo de solo. Para Dias Junior et al. (2003) diferentes sistemas de manejo podem gerar diferentes níveis de compactação em função da classe de solo e da época da realização das operações mecanizadas.

Segundo Kondo & Dias Junior (1999a) em um estudo que analisou a compressibilidade de solos sob diferentes usos, constataram que solos sob a condição de cultura anual são mais suscetíveis à compactação, do que aqueles sob mata natural e pastagem, devido à sua menor capacidade de suporte de carga para uma mesma faixa de teores de água.



Valores maiores de pressão de preconsolidação em áreas sob plantio direto em comparação ao sistema convencional foram observados por diversos autores, entre os quais, Reinert (1990), Carpenedo (1994), Dias Junior (1994), Silva et al. (2002) e Oliveira (2002), que relataram que o fato do sistema plantio direto suportar níveis de pressões mais elevados constitui uma vantagem em relação a sua trafegabilidade.

Foi observado por Silva et al. (1999) que, sob sistema de plantio direto e manejo convencional (Argissolo e um Latossolo Vermelho), a pressão de preconsolidação aumentou de forma exponencial com o aumento da densidade inicial do solo, dentro de cada classe de grau de saturação e na mesma classe de densidade inicial do solo. Os valores de pressão de preconsolidação decresceram de forma logarítmica com o aumento do grau de saturação. O índice de compressão foi inversamente proporcional à densidade inicial do solo e pouco influenciada pelo grau de saturação inicial. A suscetibilidade do solo à compactação mostrou comportamento diferente para cada tipo de solo.

Avaliando a sustentabilidade da estrutura de um Latossolo cultivado com cafeeiro na região dos cerrados, Miranda (2001) encontrou diferenças entre os sistemas estudados. O café irrigado apresentou maior suscetibilidade à compactação do solo do que o cafeeiro no sistema convencional. O autor ainda constatou a importância da água e o preparo do solo como fatores de alívio da compactação do solo.

Em estudos realizados por Dias Junior et al. (2003), em um Argissolo com textura média/arenosa, pôde-se observar que este solo suportou maiores pressões aplicadas pelas máquinas do que o Argissolo textura média/argilosa. Fica evidenciada, portanto, a importância de se identificar a textura dos solos devido à sua influência na capacidade de suporte de carga e na susceptibilidade à compactação dos solos.

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

Há alguns anos a penetrometria era utilizada para definir o comportamento do solo sob o ponto de vista de locomoção ou tração. Atualmente, várias aplicações agronômicas já estão consolidadas, tais como a detecção de camadas compactadas a ação de ferramentas de máquinas no solo e impedimento mecânico ao desenvolvimento do

sistema radicular das plantas, os processos de umedecimento, secagem e ação de fatores químicos e biológicos no solo, dentre outros (VIEIRA et al., 1997). Estas aplicações baseiam-se na avaliação da Resistência à Penetração (RP), inicialmente dificultadas pela natureza pontual da penetração e a grande variabilidade dessa medida nos diversos tipos e condições do solo (VIEIRA et al., 1997).

O índice de cone é medido por aparelhos que permitem avaliar o nível de trafegabilidade e de resistência dos solos à penetração das raízes das culturas. Os penetrômetros são aparelhos destinados a determinar a resistência mecânica do meio no qual penetra. Seu princípio de penetração se divide em dois grupos: os estáticos cuja penetração é realizada por meio de uma força contínua e os dinâmicos cuja penetração é realizada por meio do impacto de uma massa (STOLF, 1991). Para Machado et al. (1999) o índice de cone pode ser utilizado como um parâmetro adequado para a caracterização das condições físico-mecânicas do solo e estimativas das interações solo-máquina (trafegabilidade, compactação e métodos de preparo do solo) e solo-raiz (impedimento mecânico, restrição ao crescimento).

A penetrometria é considerada um método apropriado para avaliar a resistência à penetração de raízes no solo, mesmo considerando as diferenças marcantes existentes entre uma raiz e um cone metálico (BENGOUGH & MULLINS, 1990). O ideal é a mensuração da resistência real encontrada pelas raízes realizada por métodos precisos, como a densidade do solo e percentagem de macroporos. Entretanto, as dificuldades práticas têm levado os pesquisadores a utilizar o penetrômetro em sua investigação. A facilidade e a rapidez na obtenção dos resultados, além da possibilidade de um maior número de repetições, são as principais vantagens do uso do penetrômetro. A resistência à penetração, medida com penetrômetro, é expressa como índice de cone, que é a relação entre a força exercida para penetrar um cone metálico no solo e sua área basal (BRADFORD, 1986). A resistência do solo à penetração de um penetrômetro é um indicador intermediário da compactação (LANÇAS, 1996), não sendo medição física direta de qualquer condição do solo. Esta é afetada por outros fatores além da compactação, sendo o mais importante o teor de água do solo (MANTOVANI, 1987). Por esta razão só permite comparações entre solos de mesma textura e com o mesmo teor de água. 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).

Apesar da resistência mecânica do solo à penetração ser afetada pela textura, densidade do solo e teor de água, Caranache (1990) sugeriu que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes das plantas. Torres & Saraiva (1999) em experimentos com soja em Latossolos Vermelhos, observaram valores de resistência em torno de 2,5 MPa (solo na consistência friável) como baixos para promover restrição no crescimento do sistema radicular, entre 3,5 a 6,5 MPa, foram considerados possíveis problemas de impedimento mecânico. A resistência de 3,5 MPa foi considerada como baixo índice de compactação e 6,5 MPa como alto. Alguns autores, no entanto, têm adotado um índice de cone de 1,0 MPa como crítico, mas não impeditivo, ao crescimento de raízes no solo (HENDERSON, 1989). É importante lembrar que os resultados de índice de cone só permitem comparações para o mesmo tipo de solo e com o mesmo teor de água.

Foi observado por Klein et al. (1998) que o efeito do teor de água do solo na resistência mecânica à penetração a camada adensada não foi detectada, em Latossolo Vermelho para tensão de 8 kPa (teor de água na capacidade de campo), enquanto nas tensões maiores os valores de resistência superaram a resistência limitante de 2 MPa. Outros autores obtiveram resultados diferentes e constataram que não se permite a obtenção da resistência sob baixos teores de água no solo e que a resistência seja medida com teores de água próximos à capacidade de campo, situação em que se consegue uma boa correlação entre a densidade do solo, a resistência à penetração e o crescimento radicular (MATA, 1988; HENDERSON, 1989).

Em experimento realizado em um Latossolo Vermelho do norte do Paraná em área cultivada com soja, Torres & Saraiva (1999) observaram o efeito da variação do teor de água do solo, sobre o da resistência à penetração. Na densidade de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ , a resistência à penetração foi de 1,5 MPa, quando o teor de água do solo estava em torno de 37 % e de 16 MPa, quando o teor de água estava em torno de 21 %, evidenciando a grande variação da resistência com a mudança dos teores de água. Este fato pode induzir a erros de interpretação, principalmente, se forem consideradas resistências acima de 3,5 a 6,0 MPa, como sendo as que podem prejudicar o desenvolvimento das culturas. Os mesmos autores observaram também que quando o solo se encontrava com a consistência dentro do intervalo

plástico, o que se verificaram logo após uma chuva, os valores de resistência do solo à penetração obtidos com penetrômetro foram semelhantes e não caracterizaram as diferenças de compactação existentes entre os tratamentos. As avaliações feitas no solo dentro da faixa de friabilidade, teor de água em torno de 27 a 29 %, foram as mais adequadas para caracterizar as diferenças entre as densidades do solo estudadas.

Nas 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 (TORRES & SARAIVA, 1999).

#### **4.4.3 Espacialização da resistência mecânica do solo**

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um conjunto de ferramentas computacionais que permitem o armazenamento, o processamento, a análise e a sintetização de dados georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação (CÂMARA & MEDEIROS, 1998 e MOREIRA, 2001). De acordo com Moreira (2001) os SIG são compostos por três componentes básicos: o equipamento computacional; o conjunto de módulos aplicativos e o contexto organizacional apropriado. Na medida em que os dados são coletados, cada parâmetro pode ser tratado como uma camada de informação (*layer*). O sistema oferece a possibilidade de executar operações lógicas entre os diferentes planos de informações, sendo capazes de integrar muitos conjuntos de dados num único sistema. De acordo com o autor, o sucesso ou o fracasso na obtenção de informações acuradas sobre a realidade do campo depende, principalmente, da qualidade dos dados introduzidos no SIG. De acordo com Moreira (2001) qualquer SIG apresenta duas características principais: inserem e integram num único banco de dados, informações espaciais provenientes de diversas fontes e oferecem um mecanismo para combinar estas informações, por meio de algoritmos de

manipulação e análise, bem como de consulta, de recuperação, de visualização e de impressão do conteúdo do banco de dados georreferenciados. O autor enfatiza que os principais produtos gerados nos SIG são mapas, mas também são geradas importantes informações através de gráficos e relatórios.

O principal fator determinante do número de amostras por hectare num mapeamento de um atributo do solo é o nível de detalhamento (BAIO, 2001). Se, para uma dada finalidade, for necessário o maior detalhamento da variabilidade espacial do determinado atributo, a distância amostral deve ser reduzida. No entanto, se for necessário somente o estudo da variabilidade espacial do atributo numa escala menor (mapas com escalas pequenas cobrem grandes áreas) a distância amostral pode ser aumentada. Para comprovar esta linha de raciocínio, White & Zasoski (1999) elaboraram um mapa de fertilidade do solo ilustrando a variabilidade espacial do nutriente zinco para todo EUA, utilizando técnicas geoestatísticas que provaram dependência espacial e interpolação por krigagem. A distância amostral foi em média de 80 km, mesmo assim, os autores puderam elaborar o mapa desejado. Já em um outro trabalho, buscando estudar a variabilidade espacial de atributos do solo por meio de técnicas geoestatísticas, Paz-González et al. (2000) realizaram um mapeamento da fertilidade do solo numa grade amostral quadrática de 2 m de lado, alcançando dependência espacial para este nível de detalhamento. Warrick et al. (1986) mencionam que as técnicas geoestatísticas podem ser utilizadas para caracterizar e mapear a variabilidade espacial de atributos do solo em escalas, variando de centímetros a quilômetros.

A confecção de mapas digitais desenvolveu-se grandemente com a postulação da Teoria das Variáveis Regionalizadas, a qual possui os princípios da geoestatística aliados à evolução da ciência da computação e os SIGs (BURROUGH et al., 1997). Segundo tal teoria, os valores de um atributo do solo estão de alguma forma, relacionados com a sua distribuição espacial. Portanto, observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes em magnitude do que aquelas mais distantes. Entretanto, este é um processo que toma certo tempo, muitas vezes dias, até ser concluído para se chegar ao ponto da análise final. Com o desenvolvimento de técnicas de alta tecnologia, como é o caso da agricultura de precisão, algumas operações de suporte necessitam ser desenvolvidas e adaptadas para acompanhar tal avanço, como é o caso da confecção de mapas

automáticos mais exatos e práticos para serem utilizados em técnicas de manejo mais tecnificados das terras (BOUMA et al., 1999).

Os SIGs, devido a sua crescente utilização, vêm incorporando novos princípios e procedimentos de análise espacial, muitas vezes incorporando técnicas geoestatísticas. Esse esforço deve-se ao consenso, hoje existente, de que o futuro sucesso da tecnologia dos SIG depende de sua capacidade de gerar cenários confiáveis, por meio de um conjunto de procedimentos e ferramentas para modelagem espacial, que possam representar adequadamente as propriedades, os processos e suas imprecisões (CAMARGO et al., 2000).

Na Ciência do Solo, as dificuldades são maiores para a espacialização dos dados em formatos de mapas, pois a formação do solo ocorreu por diversos fatores e o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas propriedades e características. Em 1956, Ficher citado por Silva et al. (1989), propôs uma teoria de análise estatística no qual o problema da variação seria resolvido por casualização e repetição e tem sido referida como estatística clássica. Esta estatística considera o campo como um conjunto de observações, reduzidas em uma média e medidas da sua divergência, sem considerar a distribuição espacial. Entretanto, esta seria uma análise simplista e não considera que há uma dependência espacial para os valores amostrados em campo, como é o caso da resistência mecânica do solo.

A geoestatística apresenta grande utilidade para caracterizar e mapear as variações espaciais, com os mais diversos propósitos, principalmente para o estudo de variáveis no campo da física de solos. Os procedimentos mais comuns incluem a caracterização e o modelamento da variabilidade espacial, por meio da estimativa dos valores nos locais não visitados, simulações espaciais e otimização dos esquemas de amostragem (CAMBARDELLA et al., 1994 citado por COUTO & KLAMT, 1999). Segundo Dias Junior et al. (2003) a variabilidade dos valores de densidade do solo pode estar associada ao manejo do solo e a intensidade nos quais os processos pedogenéticos ocorreram.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em uma área rural do município de Piracicaba (22° 34' 32''S e 47° 41' 31''WG) e constou de sete talhões com áreas que variam de 4,88 a 13,38 ha e uma mata para servir de testemunha. As características associadas aos talhões avaliados tais como: números e tamanho de talhões, tipo de solo, variedades, estágio da cultura (ciclo) e algumas informações de produtividade são apresentadas na Quadro 1.

Quadro 1. Número e área dos talhões avaliados, tipo de solo, variedades, estágio da cultura (ciclo) e alguns dados de produtividade da área avaliada.

Talhão	Área (ha)	Tipo de Solo	Variedade	Estágio	Prod.Obs. t ha <sup>-1</sup>
I <sub>LV</sub>	10,65	LV	RB84-5257	3º ciclo	92
II <sub>LV</sub>	5,62	LV	RB84-5257	3º ciclo	80
III <sub>LV</sub>	8,34	LV	RB78-5148	2º ciclo	85
IV <sub>PV</sub>	4,88	PV	RB72-454	6º ciclo	46
V <sub>PV</sub>	4,88	PV	RB72-454	6º ciclo	46
VI <sub>PV</sub>	9,89	PV	RB72-454	6º ciclo	69
VII <sub>R</sub>	13,38	R	RB85-5113	3º ciclo	99
VIII <sub>RMata</sub>	-	R	-	-	-

Prod. Obs. – produtividade observada (t ha<sup>-1</sup>).

Os tipos de solos que predominam na área de estudo, segundo a Embrapa (1999) são: i) Latossolo Vermelho - LV (Talhões I<sub>LV</sub>, II<sub>LV</sub> e III<sub>LV</sub>), considerado

uma importante classe de solo e com grande significado agronômico por ocupar grandes extensões do território brasileiro em relevo pouco movimentado; ii) Argissolo Vermelho-Amarelo - PV (Talhões IV<sub>PV</sub>, V<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub>), solos medianamente intemperizados, apresentam grande diversidade quanto à profundidade, textura, eutrofismo, saturação por bases e alumínio, cascalhos, pedras e matações, plintita, além da ocorrência nos mais variados relevos, o que lhe confere a maior suscetibilidade à erosão, especialmente em terrenos mais acidentados; e ii) Neossolo Quartzarênico distrófico - R (talhão VII<sub>R</sub> e VIII<sub>Rmata</sub>), solos pouco evoluídos e com pequena espessura do *solum*, dificultando a penetração do sistema radicular.

## **5.2 Obtenção e tratamento das amostras e de seus resultados**

### **5.2.1 Modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS)**

Esta etapa consistiu em coletar, de acordo com o talhão, amostras indeformadas na camada de 0,0 a 0,025 m (1) e na profundidade de maior resistência mecânica (2), determinada previamente por meio de um perfil de penetrometria, obtido com o auxílio de penetrômetro hidráulico eletrônico desenvolvido por Lanças et al. (2000). Os anéis de amostragem tinham dimensões de 0,025 x 0,060 m de altura e diâmetro, respectivamente, as quais atendem as especificações do consolidômetro. Estes foram cravados e extraídos do solo como auxílio de um amostrador desenvolvido especificamente para esse fim (Figura 2). Em seguida foram devidamente impermeabilizados (papel filme e parafina), objetivando manter o teor de água de campo e, em seguida encaminhados ao laboratório. Dessa forma manteve-se a história de tensão da amostra, isto é, a manutenção da estrutura do solo fora mantida tal como se encontrava no campo. Cada modelo de CSCS foi gerado em função de 5 teores de água e 3 repetições, totalizando 15 anéis por modelo. Como foram amostrados 8 talhões em 2 profundidades (profundidade 1 – 0,00 a 0,025 m e profundidade 2 - camada onde apresentou maior resistência mecânica do solo à penetração avaliada a partir do uso do penetrômetro hidráulico eletrônico), o número total de amostras não perturbadas ensaiadas foram de 240.





Figura 2. Procedimento para a coleta de amostras indeformadas a serem ensaiadas em laboratório: (a) limpeza do terreno ou acesso a camada subsuperficial (profundidade 2); (b) coleta da amostra com o anel; (c) limpeza da amostra; e (d) embalagem e identificação da amostra.

### 5.2.2 Mapas de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS)

Para desenvolvimento dos mapas de capacidade suporte de carga do solo (CSCS), a usina nos forneceu uma área sobre uma mancha de Latossolo Vermelho (talhão III), com aproximadamente de 8,34 ha, cujo cultivo se encontra no 2º ciclo. As amostragens foram feitas e georreferenciadas no sentido longitudinal e transversal em uma grade de 60 x 60 metros, sempre que as curvas de nível e os carregadores permitiam, totalizando 32 pontos amostrados (Figura 3), sendo dezesseis amostras na camada de 0,0 a 0,025 m - profundidade 1, e dezesseis na camada onde se apresentou maior resistência mecânica do solo à penetração avaliada a partir do uso do penetrômetro hidráulico eletrônico - profundidade 2, em um total de 192 amostras indeformadas (32 amostras, 2 profundidades, 3 repetições).

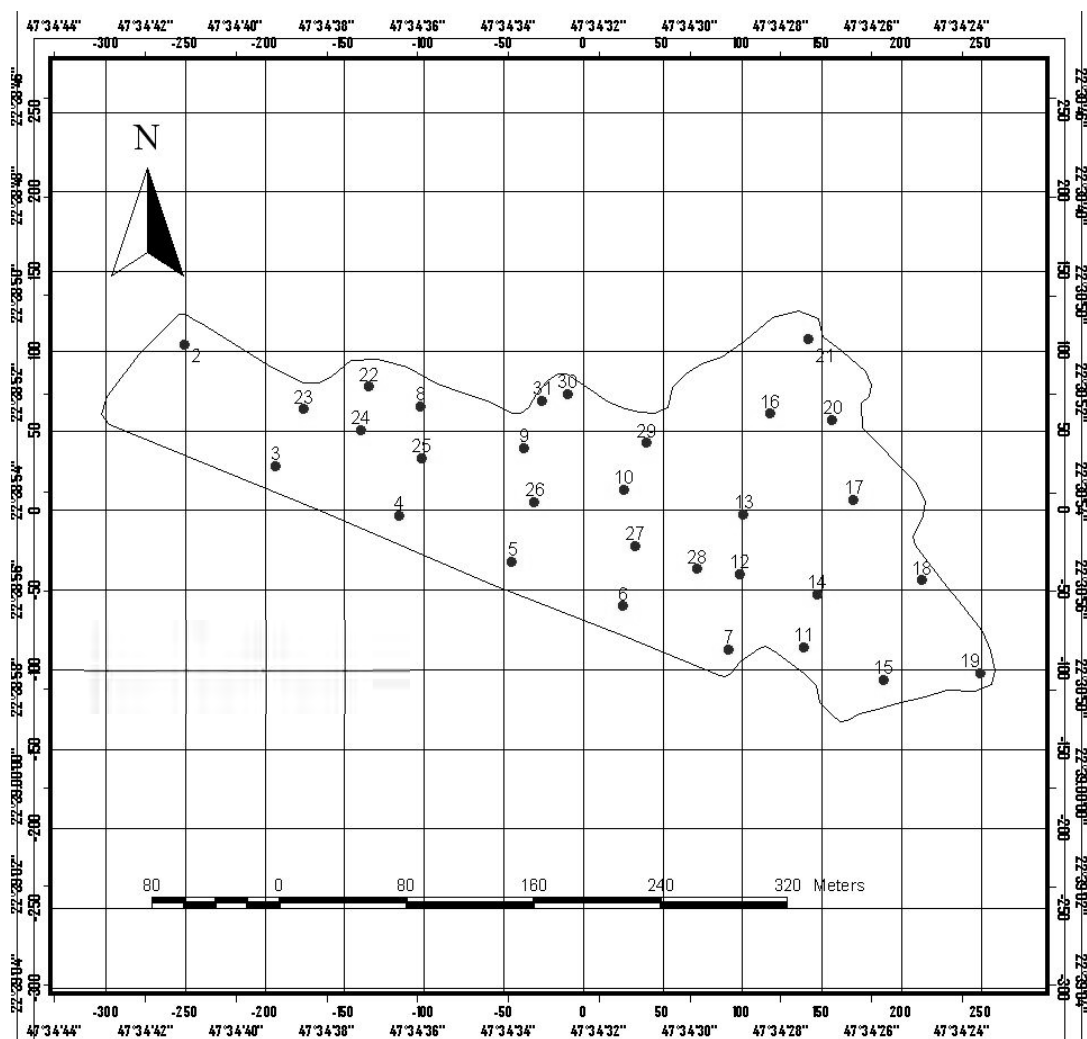


Figura 3. Espacialização dos pontos amostrados para elaboração dos mapas de capacidade de suporte de carga do solo.

### 5.2.2.1 Análise estatística dos dados amostrados

Procedeu-se a análise estatística dos dados para a verificação de seu comportamento quanto às medidas estatísticas de posição e de dispersão, antes de submetê-los à análise geostatística. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa Excel. Foram realizadas as análises de medidas de posição (média, valores máximo e mínimo, quartis superior e inferior) e de dispersão (desvio padrão e variância).

O cálculo dos quartis da distribuição dos valores das variáveis mensuradas auxiliou na identificação dos dados discrepantes da distribuição normal (*outliers* – pontos fora da faixa). O cálculo para a identificação dos dados candidatos a discrepantes foi realizado pelo critério dos limites inferior e superior de uma distribuição normal (LIBARDI et al., 1996; GONÇALVES et al., 1999). Os limites superior e inferior foram obtidos pelas equações:

$$AI = QS - QI \quad (1)$$

$$LS = QS + (1,5 * AI) \quad (2)$$

$$LI = QI - (1,5 * AI) \quad (3)$$

Em que:

*AI* é a Amplitude Interquartil;

*LS* é o Limite Superior;

*LI* é o Limite Inferior;

*QS* e *QI* são os Quartis Superior e Inferior.

Os dados que não se enquadraram entre o limite inferior e superior foram considerados dados discrepantes e não utilizados na elaboração dos variogramas, entretanto, foram considerados para a interpolação por krigagem e obtenção dos mapas.

### 5.2.2.2 Análise geoestatística dos dados amostrados

A análise geoestatística foi realizada pelo programa (GS+, 2000). De posse dos dados dos atributos mapeados foram obtidos os variogramas experimentais. A estes variogramas experimentais foram ajustados os variogramas teóricos. Os variogramas teóricos são curvas ajustadas que proporcionam a máxima correlação entre os pontos dos variogramas experimentais. O programa GS+ realizou a escolha do melhor modelo do variograma teórico baseado na minimização das soma dos quadrados dos resíduos, em relação aos pontos do variograma experimental. Foram avaliados os modelos de variogramas esférico, exponencial, gaussiano e linear.

Os modelos dos variogramas teóricos ajustados foram selecionados por meio da análise do valor do coeficiente de correlação, obtido pela validação cruzada

(valores lidos versus valores estimados), e este foi o fator que mais influenciou na escolha do modelo (VIEIRA, 1995). Em caso de igualdade entre os resultados da validação cruzada, o modelo escolhido foi o que possuía o menor efeito pepita, pois este fator ilustra o quanto da variabilidade espacial não está sendo descrito pelo modelo.

Após o ajuste dos variogramas teóricos foram tomados todos os parâmetros necessários para a realização da interpolação dos mapas pelo processo de krigagem.

Também foi calculada a relação entre o efeito pepita e o patamar ( $C_0/C_0+C$ ) para cada modelo ajustado. Esta relação mede o grau da dependência espacial do atributo amostrado (CAMBARDELLA et al., 1994). O grau de dependência espacial pode ser classificado como: forte, quando o variograma apresentar efeito pepita menor ou igual a 25 % do patamar; moderado, quando esta relação estiver entre 25 e 75 %; fraco, quando o efeito pepita foi superior a 75 % do patamar. Assim, quanto menor esta relação, menos o efeito pepita está influenciando a dependência espacial dos dados.

### **5.2.2.3 Interpolação dos dados amostrados**

Os parâmetros dos modelos dos variogramas obtidos pela análise geoestatística foram utilizados para a realização da interpolação dos dados por krigagem. O tipo de krigagem escolhido para a realização da interpolação das variáveis mapeadas foi a krigagem ordinária em blocos. A krigagem ordinária leva em consideração a estacionaridade (dispersão em torno da média homogênea) somente nas vizinhanças do ponto amostrado (hipótese intrínseca), sem a perda de informações em relação a krigagem simples. A krigagem em blocos é mais adequada, pois não perde em qualidade em relação a krigagem pontual, reduz a variância de krigagem e proporciona uma estimativa mais confiável (GONÇALVES et al., 1999). Os mapas foram elaborados em formato matricial com células de 5 x 5 m e foram georreferenciados no sistema de coordenadas geográficas.

### 5.3 Obtenção da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ )

Foram coletadas 15 amostras nos sete talhões em estudo (Latossolo talhão I<sub>LV</sub>, II<sub>LV</sub> e III<sub>LV</sub>, Argissolo – talhão IV<sub>PV</sub>, V<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub>, Neossolo – talhão VII<sub>R</sub> e VIII<sub>Rmata</sub>, cuidadosamente parafinadas no campo, para evitar que ocorresse alteração da umidade desde o momento da coleta até a realização do ensaio de compressibilidade no laboratório, este ensaio consistiu em aplicar sucessiva e continuamente pressões crescentes e preestabelecidas em um corpo de prova. Estas amostras foram equilibradas em cinco teores de água com três repetições por profundidade (profundidade 1 – 0,0 a 0,025 m e profundidade 2 – camada em que apresentou maior resistência mecânica à penetração determinada a partir do penetrômetro hidráulico eletrônico), totalizando 210 amostras indeformadas (15 amostras X 2 profundidades X 7 talhões). As amostras indeformadas foram obtidas através de um amostrador de Uhland com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro e 2,54 cm de altura. Estas amostras foram utilizadas para a obtenção dos modelos de sustentabilidade da estrutural do solo.

A amostra de solo coletada apresentou estrutura indeformada. Para evitar uma possível alteração do teor de água da amostra, a mesma foi parafinada e identificada. No laboratório, com o auxílio da faca, retirou-se o excesso de solo do corpo de prova, determinou-se o teor de água inicial, ajustando a sua face superior e inferior para que possuía o volume do anel volumétrico. Determinou-se o peso do anel volumétrico + corpo de prova e revestiu-se a face inferior com gaze, prendendo-a com elástico.

Para realização do ensaio de compressibilidade, consideraram-se as seguintes condições de teor de água: seca, e ou, tenaz (cinco por cento de teor de água), saturada e em uma condição onde o teor de água da amostra apresentou-se na região de friabilidade. A região de friabilidade (região entre o limite de contração e o limite de plasticidade) do referido solo foi determinada a partir de ensaios de limite de consistência (BOWLES, 1978 e SOWERS, 1965). Em seguida, colocou-se sobre as duas faces do corpo de prova, um círculo de papel de filtro, e submeteu-se no consolidômetro a amostra ao ensaio de compressibilidade (BOWLES, 1986). Após o encaixe do anel volumétrico + corpo de prova na célula de compressão, verificou-se se o extensômetro e a célula de compressão foram fixados adequadamente no consolidômetro e iniciou-se a aplicação da primeira pressão, de 25 kPa,

fazendo a leitura no extensômetro, nos tempos de 00'', 15'', 30'', 1', 2', 4', 8' e 15', até a obtenção de 90 % da deformação máxima para a pressão aplicada. Assim ao se obter 90% da deformação máxima (aos 15 minutos, aproximadamente), parou-se o ensaio de compressibilidade, elevando-se então a pressão para 50 kPa, e reiniciou-se a leitura. Fez-se o mesmo para as pressões de 100, 200, 400, 800, 1600 kPa, quando se encerrou o ensaio, retirando-se o conjunto anel volumétrico + corpo de prova do consolidômetro, e secando-o em estufa a 105-110° C. Determinou-se então o peso do corpo de prova seco em estufa + anel volumétrico e do anel e do anel volumétrico, calculando-se a teor de água correspondente. Plotou-se a densidade no eixo das ordenadas (escala decimal) versus as pressões aplicadas no eixo das abscissas (escala logarítma), obtendo-se a curva de compressão do corpo de prova ensaiado.

Estes ensaios permitiram obter a curvas de compressão do solo, a partir das quais se obtiveram as pressões de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), que foram ajustadas em função do teor de água (U), conforme o modelo proposto por Dias Junior (1994):

$$\sigma_p = 10^{(a+bU)}, \quad (4)$$

Sendo,

$\sigma_p$ : pressão de preconsolidação (kPa);

U: teor de água ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

a e b: parâmetros de ajuste.

A investigação, tendo com base os modelos de capacidade suporte de cargas considerou a influência dos seguintes fatores: solo, que de acordo com a EMBRAPA (1999), são Latossolos, Neossolos, Argissolos e, profundidade (1: 0,0 a 0,025 m; 2: camada de maior resistência mecânica do solo à penetração determinada a partir do penetrômetro hidráulico eletrônico).

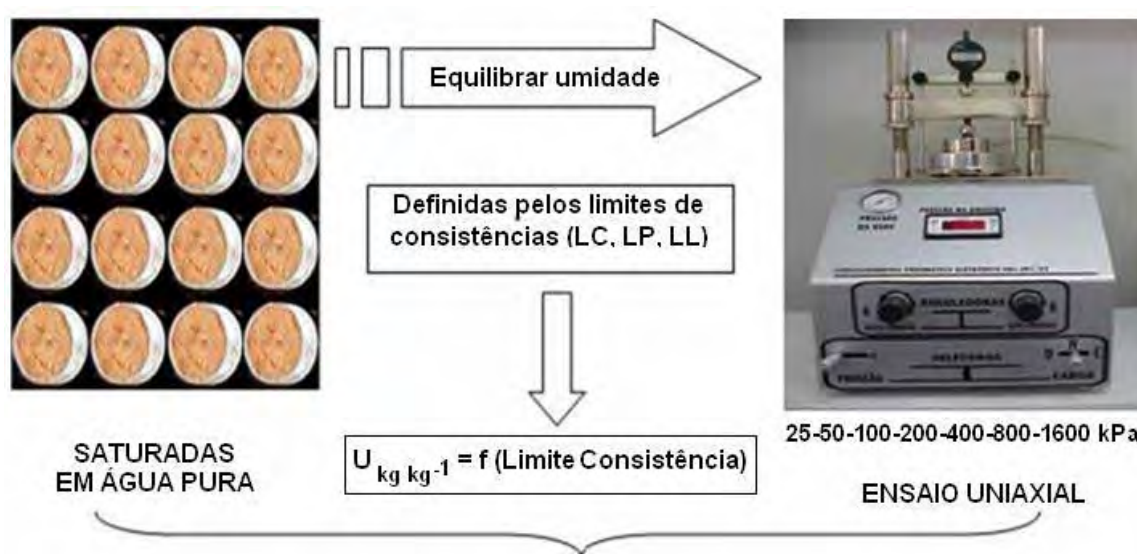


Figura 4. Procedimentos laboratoriais para realização dos ensaios de compressibilidade e obtenção da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ). LC (Limite de Contração), LL (Limite de Liquidez) e LP (Limite de Plasticidade). Consolidômetro desenvolvido por Silva et al. (2005a).

#### 5.4 Sistematização e análise dos resultados

Os modelos de capacidade suporte de carga obtidos foram agrupados dentro de cada classe de solo, analisados e comparados entre profundidade e talhão. A diferença estatística entre as equações que foram ajustadas ao modelo de capacidade suporte de carga proposto por Dias Junior (1994), que depois de linearizadas, foi verificada utilizando procedimento proposto por Snedecor & Cochran (1989). O aplicativo Sigma Plot 4.0 permitiu a confecção de gráficos e diagramas. Para o estudo de dependência espacial a usina nos forneceu o talhão III<sub>LV</sub> (Latosolo Vermelho), neste caso realizou-se análise geoestatística dos dados amostrais.

## 5.5 Índice de cone

Para a determinação do índice de cone nos seis talhões em estudo exceto na mata utilizou-se neste trabalho de um penetrômetro hidráulico-eletrônico construído por Santos e Lanças (1998), equipado como um DGPS de acurácia submétrica, montado sobre uma carreta para transporte rodoviário. O sistema eletrônico possui um sistema de aquisição de dados (Microllogger 23X, Campbell), sensor de força (célula de carga de 10000 N) e sensor de profundidade (potenciômetro rotativo). O sistema hidráulico possui uma válvula de acionamento de 3 vias, uma válvula controladora de vazão e um pistão acionado pelo hidráulico do trator (controle remoto), permitindo a obtenção da pressão necessária para cravar o cone na direção normal (perpendicular) ao solo, Figuras 5 e 6. Um sensor de roda foi utilizado para possibilitar o deslocamento da carreta para amostragem em malha. As leituras foram georreferenciadas no sentido longitudinal e transversal (grade retangular) e em profundidade (a cada 10 mm). Após a coleta dos dados, foram obtidos os variogramas e, posteriormente, a confecção de mapas de isocompactação por interpolação por krigagem.

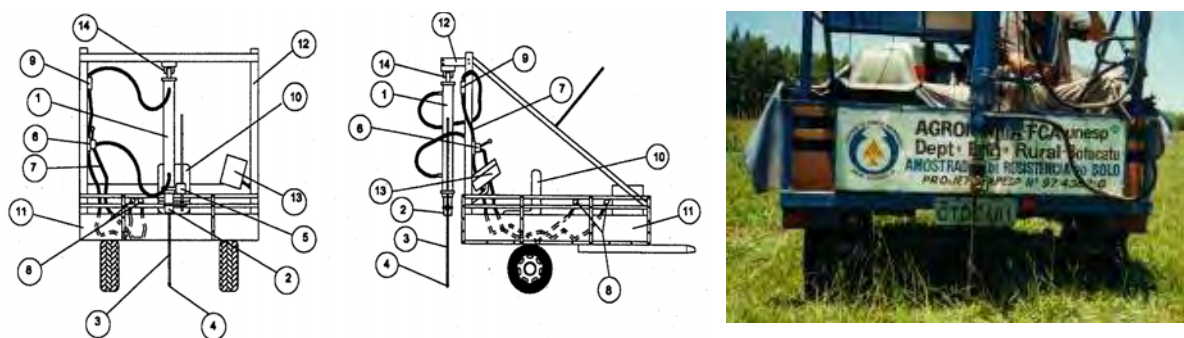


Figura 5. Vista do penetrômetro hidráulico eletrônico. (1) pistão hidráulico, (2) célula de carga, (3) haste de penetrômetro, (4) cone do penetrômetro, (5) potenciômetro de deslocamento, polia de enrolamento e cabo, (6) válvula de acionamento hidráulico, (7) mangueiras hidráulicas, (8) engates rápidos, (9) válvula reguladora de vazão de precisão, (10) assento do operador, (11) carreta de transporte, (12) torre de sustentação do pistão, (13) coletor de dados e (14) pino de engate.



Foi utilizado para processamento eletrônico dos dados o programa desenvolvido por Castro Neto et al. (1999). Foram retiradas amostras deformadas para determinação do teor de água nas profundidades de 0,00 a 0,20 e de 0,20 a 0,40 metros no momento das avaliações de resistência do solo à penetração. O número de pontos amostrados variou com o tamanho de cada talhão, mas sempre mantendo a grade de 30 x 30 m.



Figura 6. Vista do penetrômetro hidráulico eletrônico equipado com sistema DGPS e suas aplicações a campo.

Para o alinhamento do sistema de coleta de dados sobre o talhão planejado foi utilizado um sistema de direcionamento via satélite por barra de luz e um sensor de roda (Figura 7). Essa barra de luz foi desenvolvida para fazer aplicações em faixas paralelas e é utilizada para manter a operação em um curso predeterminado. O sistema de direcionamento via satélite por barra de luz consiste em um conjunto de pequenos Leds (luzes) que se acendem à medida que a máquina se afastava do alinhamento predeterminado, como mostrado na Figura 8. Um sensor de roda foi utilizado para formar as malhas. A distância da

malha era indicada ao operador do trator à medida que se alcançava a distância estabelecida por meio de um sensor de roda que concomitantemente com uma buzina eram acionados, indicando ao operador do trator o ponto exato da amostragem.

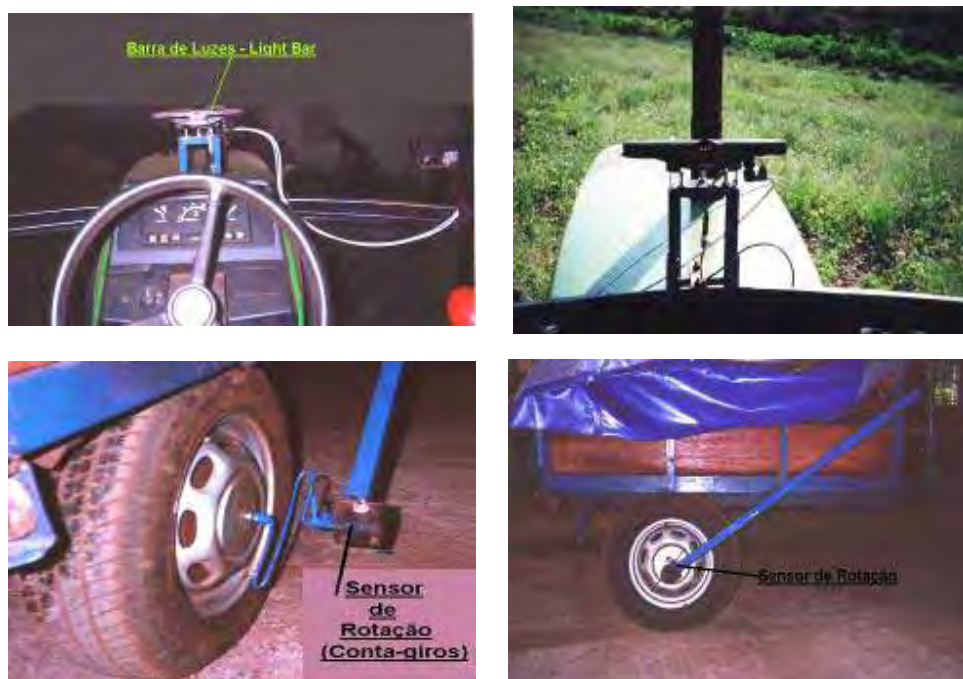


Figura 7. Vista do sistema de direcionamento via satélite e do sensor de rotação.

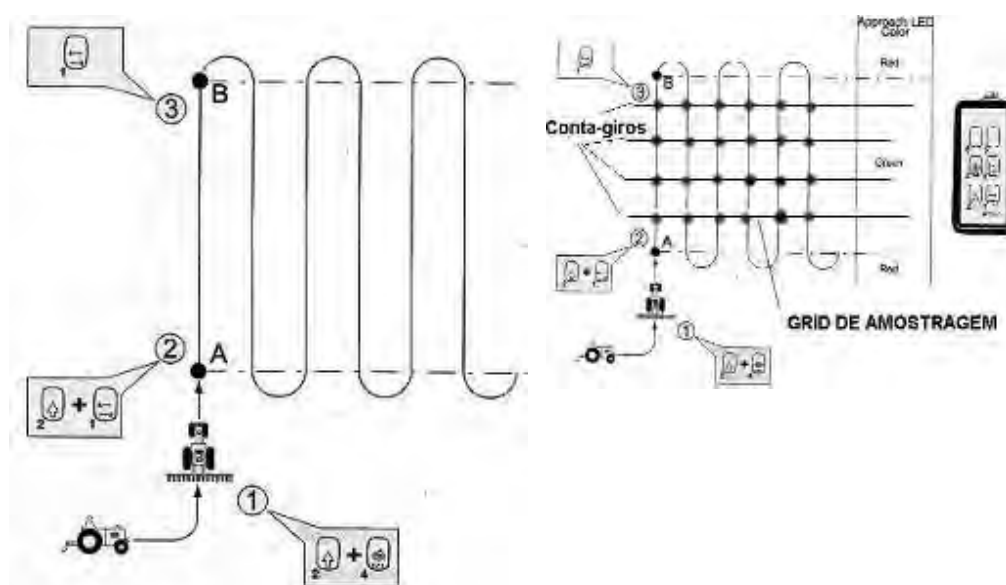


Figura 8. Esquema hipotético da utilização do sistema de direcionamento via satélite por barra de luz e sensor de rotação durante a formação das malhas.

As camadas para determinação do índice de cone foram de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20, 0,20 a 0,30, 0,30 a 0,40 e maior que 0,40 m, espaçadas de 30 em 30 metros. As camadas de maior resistência mecânica foram identificadas, pois a partir desta informação, foram coletados os anéis para fazer os ensaios uniaxiais e obter os modelos de capacidade suporte de carga.

O teor de água no solo foi monitorado durante a avaliação do índice de cone (IC) com o penetrômetro hidráulico eletrônico. Os dados foram determinados pelo método gravimétrico, em função da relação entre a massa de solo contida numa amostra sobre a massa da amostra seca em estufa a 105° C por 24 horas. Isto permitiu avaliar e estabelecer os valores de IC dentro de um mesmo talhão, de forma que os dados não fossem influenciados por distintos teores de água.

### **5.6 Atributos físicos dos solos: Ds, textura, porosidade, limites de consistência.**

Os valores de densidade do solo inicial, isto é, na condição em que o solo se encontrava no momento da amostragem podem ser vistos na Figura 9. Os valores, médias de treze repetições, depois de submetido ao teste de médias de Scott e Knott (1984), evidencia a variabilidade desse atributo não apenas entre profundidade, mas também, dentro de um mesmo talhão. Isto denota a atenção que deve ser dispensada a medidas mitigatórias, principalmente as relacionadas ao próximo preparo do solo, avaliação do desempenho operacional, entre outras. Com exceção dos talhões III<sub>LV</sub>, IV<sub>PV</sub> e V<sub>PV</sub>, fica evidenciada a maior resistência mecânica da profundidade (2), o que certamente preconiza nos próximos cultivos a descompactação dessas camadas. No talhão IV<sub>PV</sub> e V<sub>PV</sub>, os maiores valores de D<sub>si</sub> na profundidade de 0,0 a 0,025 m (1) estão associados à constituição granulométrica, que neste caso, como verificado na área, predomina partículas mais grosseiras, consequência do processo pedogenético daquela classe de solo.

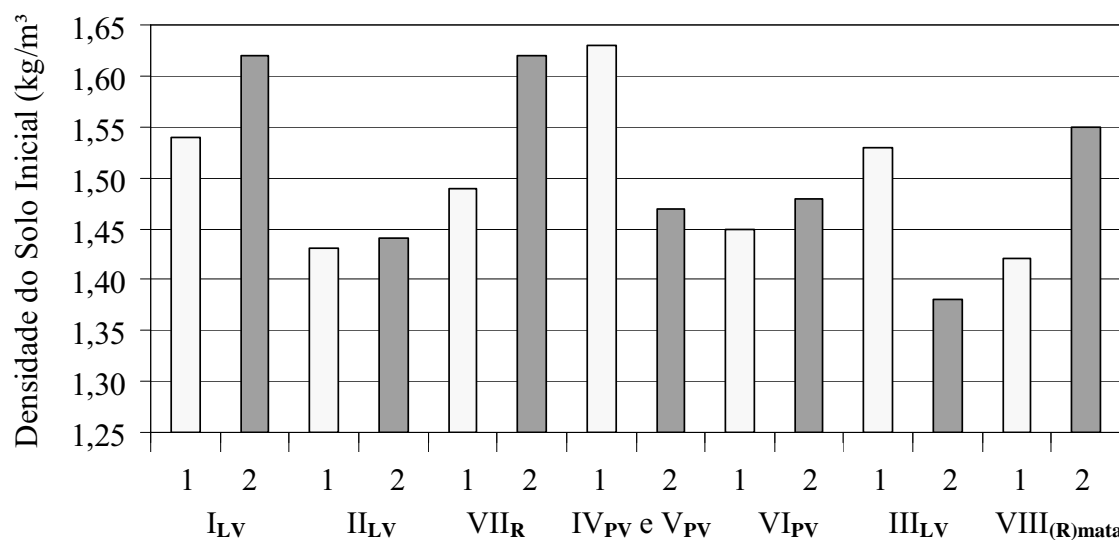


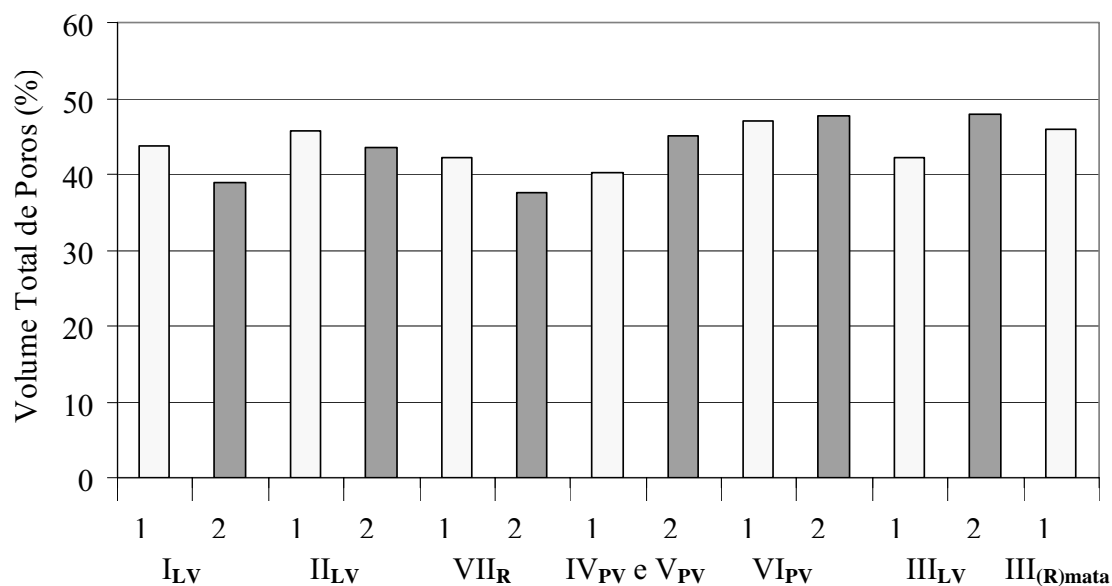
Figura 9. Densidade do solo inicial (Dsi) da profundidade 0,0 a 0,025 m (1) e de maior resistência mecânica (2) em seus respectivos talhões.

De maneira geral, independentemente da grade, profundidade e até mesmo o solo, os valores de Dsi estão muito altos (Quadro 2). As médias variaram de  $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$  a  $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo que as maiores frequências dos valores ficaram acima de  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ . Tomando como referência densidade de  $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ , valor de Dsi da profundidade 1 da mata, todas as áreas estão com a sua compactidade alterada, muito embora este valor, provavelmente, esteja associado a desenvolvimento pedogenético.

Quadro 2. Valores médios de textura e densidade ( $D_{si}$ : densidade do solo inicial;  $D_{s_{op}}$ : densidade do solo na pressão de preconsolidação) de um Latossolo Vermelho distrófico (LV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PV) e um Neossolo Quartzarênico (R), em suas respectivas profundidades (1: 0,0 a 0,025 m; 2: camada de maior resistência mecânica à penetração).

Caracterização física dos solos							
Talhão	Solo	Prof. (m)	Textura ( $g\ kg^{-1}$ )			Densidade ( $Mg\ m^{-3}$ )	
			areia	silte	argila	$D_{si}$	$D_{s_p}$
I <sub>LV</sub>	LV	1	660	213	127	1,54	
		2	580	233	187	1,62	1,73
II <sub>LV</sub>	LV	1	610	286	104	1,43	
		2	620	235	145	1,44	1,62
III <sub>LV</sub>	LV	1	380	250	370	1,53	
		2	350	220	430	1,38	1,48
IV <sub>PV</sub> e V <sub>PV</sub>	PV	1	360	370	270	1,63	
		2	350	290	360	1,47	1,71
VI <sub>PV</sub>	PV	1	420	270	310	1,45	
		2	420	250	330	1,48	1,58
VII <sub>R</sub>	R	1	750	120	130	1,49	
		2	760	60	180	1,62	1,68
VIII <sub>Mata</sub>	R	1	760	70	170	1,55	1,58

Os valores do volume total de poros (VTP) das áreas estudadas, assim como a  $D_{si}$ , também evidenciam a influência do tráfego solicitado pelo cultivo da cana-de-açúcar, sobre a estrutura do solo (Figura 10). A profundidade (2) de maior resistência mecânica, com exceção to talhão IV<sub>PV</sub> e V<sub>PV</sub>, apresentou menores valores de VTP que do que a profundidade (1), corroborando os dados de  $D_{si}$  e, evidenciando, portanto, a presença de compactação dessas áreas. Na Figura 10 está delimitada a faixa de VTP para solos arenosos e solos argilosos, recomendados pela literatura. Fica claro, que mesmo o Latossolo Vermelho distrófico e o Argissolo Vermelho-amarelo (talhão I<sub>LV</sub>, II<sub>LV</sub> e talhão IV<sub>PV</sub> e V<sub>PV</sub>, respectivamente) estão muito aquém dos valores adequados. O Neossolo Quartzarênico (talhão VII<sub>R</sub>) manteve o mesmo comportamento, os valores observados estão também abaixo da faixa sugerida pela literatura.



F

resistência mecânica a penetração (Z) em seus respectivos talhões.

Pela distribuição de frequência dos valores do VTP para os talhões, observou-se que dos 117 dados avaliados, cerca de 87 % ficaram abaixo dos 45 % de VTP. Todavia, é recomendada a necessidade de que seja feita uma quantificação e diferenciação dessa porosidade para que possa verificar a relação entre macro e microporos, muito embora, estes tipos de manejos, ocorrem sempre um aumento da microporosidade em detrimento da redução da macroporosidade.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Estatística descritiva e geoestatística dos atributos dos solos: argila, silte, areia e matéria orgânica

O Quadro 3 ilustra os resultados da análise estatística descritiva realizada dos atributos dos solos no Talhão III<sub>LV</sub>: areia, silte, argila e matéria orgânica. Pode-se verificar que os dados são heterogêneos, ou seja, os dados apresentam grande variabilidade. Baseados nos Limites Superiores e Inferiores para cada atributo, foram determinados os dados discrepantes no conjunto de dados, os quais não foram considerados nas respectivas análises geoestatísticas.

Quadro 3. Resultados da análise estatística descritiva realizada dos atributos dos solos: areia, silte, argila e matéria orgânica.

	Areia	Silte	Argila	M.O
	$\text{g kg}^{-1}$			
Média	215	240	545	22,9
Quartil Superior	229	241	530	23,0
Quartil Inferior	198	248	554	22,0
Amplitude Interquartil	48	27	58	1,0
Limite Superior	307	291	664	24,5
Limite Inferior	117	185	431	20,5
Simetria	0,3	1,0	-0,6	1,3
Curtose	-0,7	1,1	-0,1	1,4

O Quadro 4 ilustra o resultado da análise geoestatística para os dados dos atributos dos solos mapeados para o Talhão III<sub>LV</sub>. Estão listados todos os parâmetros que foram utilizados para seleção do melhor modelo do variograma e para a interpolação e geração dos mapas por krigagem.

Quadro 4. Modelos e parâmetros, referentes aos variogramas ajustados, para os valores de areia, silte, argila e matéria orgânica, obtidos para o Talhão III<sub>LV</sub>.

	Parâmetros dos modelos ajustados			Co/Co+C (%)	
	Modelo	Co <sup>1</sup>	C+Co <sup>2</sup>		A <sup>3</sup>
Areia	Esférico	247,0	1122,00	218	22,0
Silte	Esférico	1,0	385,00	47	0,3
Argila	Esférico	1,0	1191,00	57	0,1
Matéria Org.	Esférico	1,2	2,69	63	44,6

<sup>1</sup> Efeito pepita, <sup>2</sup> Patamar, <sup>3</sup> Alcance.

O grau de dependência espacial dos variogramas ajustados foi considerado forte ( $Co/Co+C < 25\%$ ) para todos os atributos estudados, exceto para a matéria orgânica que obteve um grau de dependência espacial moderado ( $25\% < Co/Co+C < 75\%$ ).

Os modelos dos variogramas com efeito pepita pequeno (areia, silte, argila e matéria orgânica) mostraram que toda a variabilidade espacial está sendo descrita adequadamente pelo modelo ajustado.

O modelo que se mostrou mais adequado para explicar a estrutura da variabilidade espacial dos atributos mapeados foi o esférico (Figura 11).



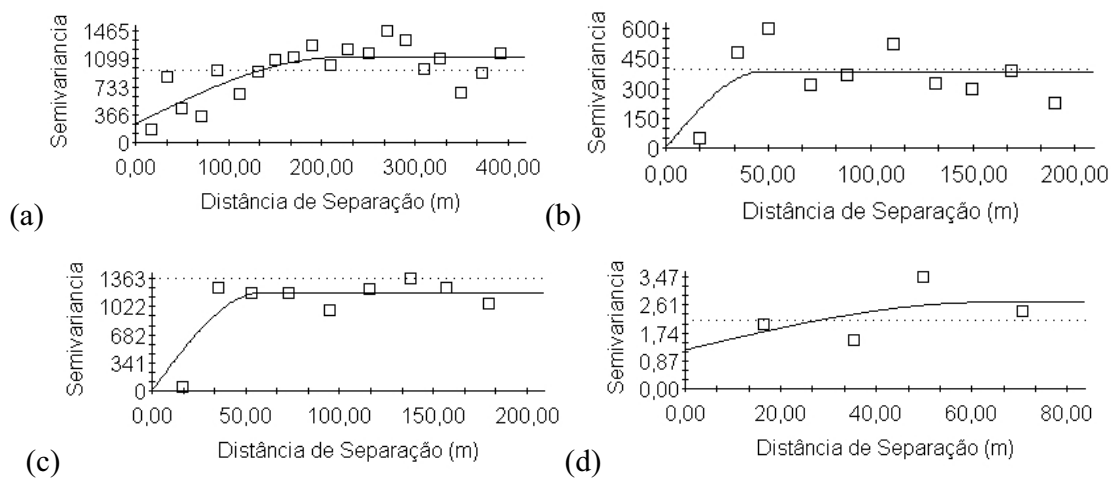


Figura 11. Variogramas referentes aos valores de Areia (a), Silte (b), Argila (c) e Matéria Orgânica (d) obtidos no Talhão III<sub>LV</sub>.

### 6.1.1 Variabilidade espacial dos atributos dos solos: argila, silte, areia e matéria orgânica

A Figura 12 ilustra a variabilidade espacial dos atributos mapeados no Talhão III<sub>LV</sub>: Areia, Silte, Argila e Matéria Orgânica.

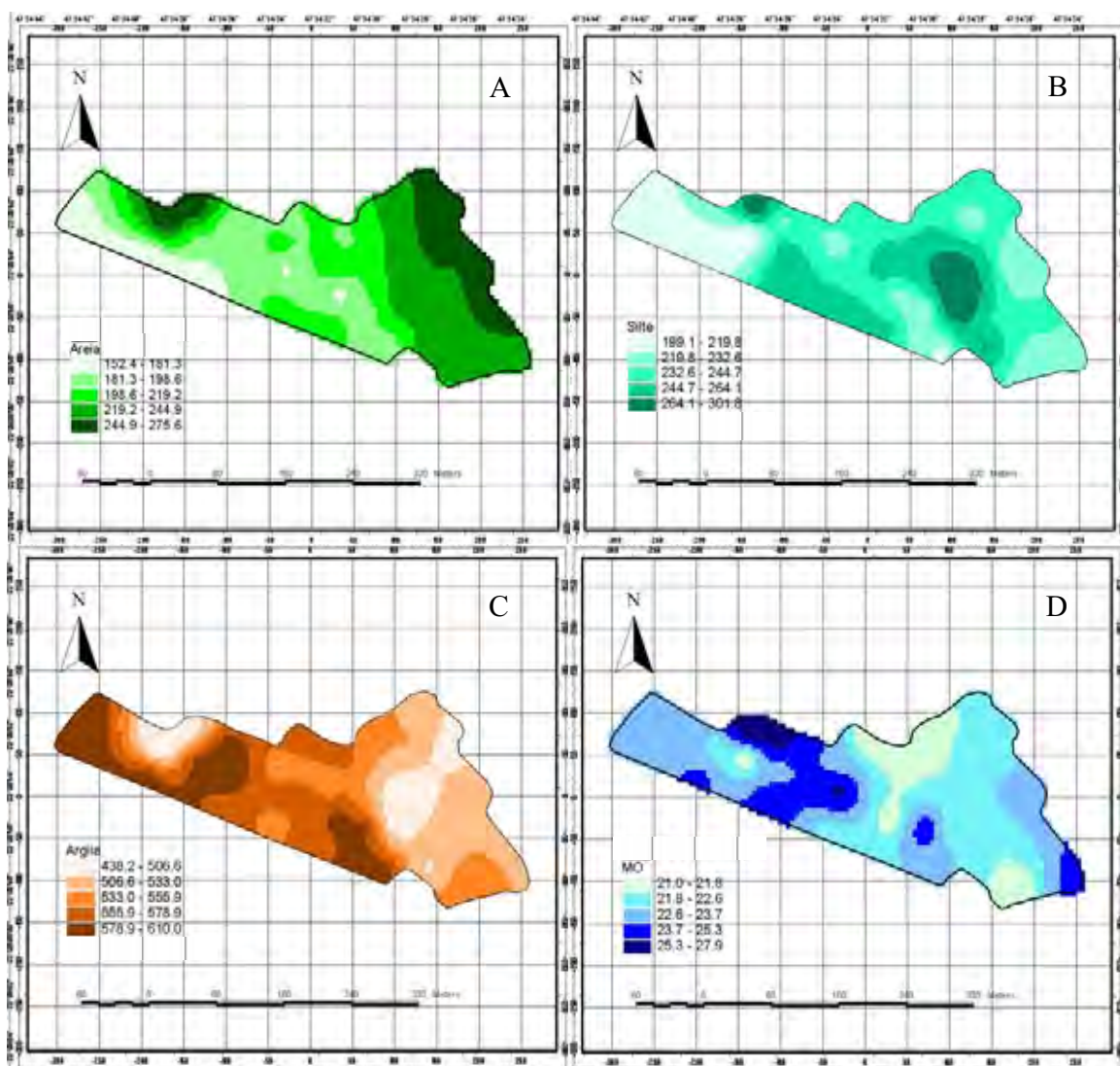


Figura 12 - Ilustração da variabilidade espacial dos atributos Areia (A) ( $\text{g Kg}^{-1}$ ), Silte (B) ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Argila (C) ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e MO ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (D) para o Talhão III<sub>LV</sub>.

## 6.2 Capacidade de suporte de carga e a consistência do solo

No Quadro 5 a variabilidade dos atributos do solo mais uma vez é corroborada pelos limites de consistência. O LL (limite de liquidez), LP (limite de plasticidade) e LC (limite de contração) diferenciam-se entre grades, até mesmo dentro de um único talhão. Essas informações já possibilitam um manejo diferenciado, quando possível, no

que se refere aos preparos das áreas, tráfego de máquinas e momento da colheita, principalmente depois de chuvas torrenciais, momento em que o solo certamente estará com teores de água muito elevados em seu perfil.

Quadro 5. Limites de consistência (LL - limite de liquidez; LP - limite de plasticidade; LC - limite de contração), volume total de poros (VTP), densidade do solo inicial ( $D_{si}$ ), densidade do solo na pressão de preconsolidação ( $D_{s\sigma_p}$ ) e a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) para cada limite de consistência.

Talhão	Prof. (m)	Consistência do solo (%)					Porosidade ( $m\ m^{-3}$ )	Densidade do Solo ( $Mg\ m^{-3}$ )			$\sigma_p$ (kPa)	
		Teor de Água						P	$D_{si}$	$D_{s\sigma_p}$		
		LL	LP	LC	RP	RF						$\sigma_{pLL}$
I <sub>LV</sub>	1	28	22	12	6	10	44	1,53	1,73	233	286	400
	2						40	1,63		84	145	361
II <sub>LV</sub>	1	19	12	10	7	2	46	1,40	1,62	177	257	285
	2						44	1,45		258	384	429
III <sub>LV</sub>	1	44	35	16	9	19	42	1,53	1,48	622	624	628
	2						48	1,38		664	666	670
IV <sub>P</sub>	1	20	18	16	2	2	42	1,51	1,68	226	240	255
	2						38	1,62		181	193	206
V <sub>P</sub>	1	25	17	11	8	6	40	1,63	1,71	358	433	500
	2						45	1,47		343	426	502
VI <sub>P</sub>	1	57	32	21	25	11	42	1,60	1,51	714	719	722
	2						41	1,39		667	670	672
VII <sub>R</sub>	1	50	34	15	16	19	47	1,45	1,58	701	705	708
	2						38	1,62		181	193	206
VIII <sub>RMata</sub>	1	23	17	16	6	1	46	1,42	1,58	144	186	195

Prof. 1 (0,0 a 0.025 m), Prof. 2 (camada de maior resistência mecânica à penetração), LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), LC (Limite de Contração), RP (Região de Plasticidade), RF (Região de Friabilidade), P ( Porosidade),  $D_s$  (Densidade do Solo) e  $\sigma_p$  (Pressão de Preconsolidação).

Com base nos modelos de capacidade suporte de carga (Quadro 5) e nos limites de consistências foi calculado a  $D_{s\sigma_p}$ . Essa densidade representa o valor crítico da relação massa/volume que o solo pode atingir quando submetidos ao tráfego. Essa é uma proposta prática de se estimar, através da densidade referente à pressão de preconsolidação

( $\sigma_p$ ), o quanto de carga o solo ainda pode suportar. Este tipo de proposta está de acordo com trabalhos correlatos desenvolvidos por Silva et al. (2004). Deve-se salientar que este valor é ajustado para quando o solo for trabalhado na faixa friável, e se caso isso não aconteça, esses valores serão significativamente reduzidos. Um outro fato é que deve ser evitado que o solo chegue nessa densidade, pois ela representa um ponto eminente de depauperação irreversível do solo. Os valores de  $Ds\sigma_p$  denotam também a variabilidade da capacidade de suporte das áreas, e mais do que isso, evidencia a necessidade e, ou o cuidado de um dimensionamento, quando viável, das máquinas diferenciado, respeitando sempre que possível, a capacidade de suporte de cada área.

Quadro 6. Parâmetros dos modelos  $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$  com seus respectivos coeficientes de determinação.

Talhão	Prof. (m)	Parâmetros do modelo			Teste de Snedecor & Cochran (1989)
		a	b	R <sup>2</sup>	SP vs SSP
I <sub>LV</sub>	1	2,777	-1,461	0,89**	**
I <sub>LV</sub>	2	3,032	-3,954	0,90**	**
II <sub>LV</sub>	1	2,685	-2,298	0,87**	**
II <sub>LV</sub>	2	2,878	-2,451	0,88**	**
III <sub>LV</sub>	1	2,801	-1,309	0,83**	ns
III <sub>LV</sub>	2	2,801	-1,309	0,83**	ns
IV <sub>P</sub>	1	2,796	0,899	0,89**	ns
IV <sub>P</sub>	2	2,796	0,899	0,89**	ns
V <sub>P</sub>	1	2,861	-1,293	0,92**	**
V <sub>P</sub>	2	2,829	-0,915	0,96**	**
VI <sub>P</sub>	1	2,836	-1,135	0,87**	ns
VI <sub>P</sub>	2	2,836	-1,135	0,87**	ns
VII <sub>R</sub>	1	2,617	-1,315	0,91**	**
VII <sub>R</sub>	2	2,542	-1,424	0,83**	**
VII <sub>RMata</sub>	1	2,59	-1,88	0,83**	**

(ns) não significativo(\*) significativo a 5% de probabilidade; (\*\*) significativo a 1% de probabilidade.

Os modelos de capacidade suporte de carga, que são uma função exponencial entre a  $\sigma_p$  e a  $U$ , obtidos para as condições desse estudo, evidenciou esses efeitos. Na Figura 13 observa-se que a resistência mecânica das profundidades, avaliadas através da  $\sigma_p$ , pôde mostrar que além dos atributos físicos intrínsecos de cada solo (Quadro 6), há a influência direta do manejo. Na profundidade 2, uma relação inversa entre os valores de produtividade e a resistência mecânica do solo foi observada. Nessa profundidade o comportamento dos modelos obtidos evidencia a influência da resistência mecânica sobre a produtividade, avaliada através da pressão de preconsolidação. No intervalo de 0,11 a 0,19 Kg Kg<sup>-1</sup> do teor de água é verificado que a resistência mecânica se dá na seguinte ordem:  $V_{PV} > II_{LV} > I_{LV} > VIIR > VIII_{Rmata}$ . Concomitante, os valores de produtividade decrescem na mesma ordem para as áreas plantadas. Este tipo de estudo, além de possibilitar alternativas que ajudem estabelecer relações entre a produção e a estrutura dos solos agrícolas cultivados com cana-de-açúcar, fundamentalmente permite predizer a capacidade de suporte de carga em manejos futuros. Com esse entendimento, o dimensionamento do conjunto trator mais implemento a ser utilizado nas próximas operações deveria considerar a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) de cada talhão e cada tipo de solo.

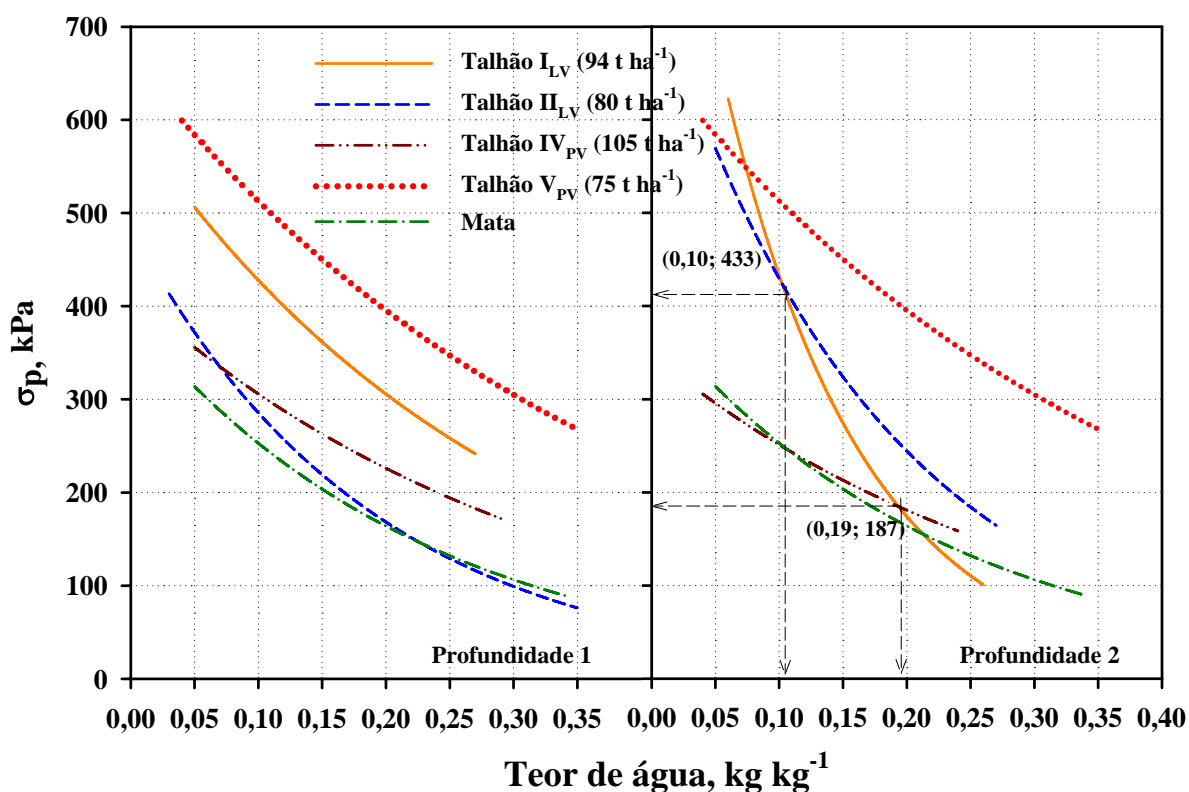


Figura 13. Resistência mecânica das grades e mata, avaliada a partir dos modelos de capacidade de suporte de carga, nas profundidades 1 e 2.

### 6.3 Compressibilidade e a capacidade de suporte de carga dos solos avaliados

Para cada profundidade de cada grade e de cada solo foram obtidos modelos de capacidade suporte de cargas, que neste caso, cabe também a expressão “modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS)”. No Quadro 7 estão apresentados os parâmetros das equações ajustadas ao modelo  $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$  para as distintas condições do estudo. Embora todos os ajustes tenham sido altamente significativos, podendo-se observar altos valores de coeficientes de determinações, sendo o menor valor encontrado 0,80 para a profundidade 1 do Talhão III<sub>LV</sub> e o maior valor 0,95, para as profundidades 1 e 2 dos talhões V<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub>. Todos os coeficientes angulares foram negativos e atendem as prerrogativas do

modelo, que preconizam a redução dos valores de  $\sigma_p$  com o aumento dos teores de água, deslocando a curva para baixo e para a direita, como demonstrado na seqüência.

Quadro 7. Parâmetros dos modelos  $\sigma_p = 10^{(a+bu)}$  com seus respectivos coeficientes de determinação. À direita, comparação das equações obtidas entre profundidade para cada talhão e entre talhão para cada profundidade, segundo proposições de Snedecor & Cochran (1989).

Tal.	Prof. (m)	Parâmetros do modelo			Teste de Snedecor & Cochran (1989)			
		a	b	R <sup>2</sup>	I vs II	Prof. (m)	Talhão I vs II	
Latossolo Vermelho distrófico								
I <sub>LV</sub>	1	2,777	-1,461	0,89**	**	1	**	
I <sub>LV</sub>	2	3,032	-3,954	0,90**				
II <sub>LV</sub>	1	2,685	-2,298	0,87**	**	2	**	
II <sub>LV</sub>	2	2,878	-2,451	0,88**				
	1	2,801	-1,361	0,80**	ns	-	-	
III <sub>LV</sub>	2	2,828	-1,359	0,88**				
	<b>1+2</b>	<b>2,801</b>	<b>-1,309</b>	<b>0,83**</b>				
Argissolo Vermelho-amarelo								
						V	V	VI
						vs	vs	vs
						VI	VII	VII
	1	2,814	-1,043	0,95**	ns	1	*	ns
IV <sub>PV</sub>	2	2,830	-1,179	0,90**				
e	<b>1+2</b>	<b>2,823</b>	<b>-1,129</b>	<b>0,91**</b>				
	1	2,860	-1,294	0,92**	*	2	*	ns
V <sub>PV</sub>	2	2,829	-0,916	0,96**				
	1	2,852	-1,2180	0,89**	ns	2	*	ns
VI <sub>PV</sub>	2	2,819	-1,0400	0,85**				
	<b>1+2</b>	<b>2,836</b>	<b>-1,1350</b>	<b>0,93**</b>				

(continua...)

Quadro 7. (...continuação)

Tal.	Prof. (m)	Parâmetros do modelo			Teste de Snedecor & Cochran (1989)		
		a	b	R <sup>2</sup>	I vs II	Prof. (m)	Talhão 1 vs 2
Neossolo Quartzarênico							
VII <sub>R</sub>	1	2,542	-1,424	0,83**	**	-	-
	2	2,617	-1,315	0,91**			
VIII Mata	1	2,590	-1,881	0,82**	-	-	-

Tal.: Talhão; Prof.: Profundidade; (ns) não significativo; (\*) significativo a 5% de probabilidade; (\*\*) significativo a 1% de probabilidade.

Para o Latossolo Vermelho distrófico, as equações obtidas tanto para profundidade quanto para o talhão, diferiram estatisticamente, denotando que a estrutura deste solo está respondendo aos manejos adotados (tráfego, preparo de solo, tempo de cultivo e etc.), de maneira diferenciada tanto no perfil como espacialmente. No perfil, isto é em profundidade, este comportamento pode ser explicado pelo tipo de característica e, ou propriedades do solo que diferem com as camadas e horizontes, influenciando por sua vez, na sua estrutura. Todavia, como se trata de um mesmo talhão, a diferença para a mesma profundidade pode ser atribuída à variabilidade espacial ou as próprias técnicas de manejo, por exemplo, regulagem inadequada de equipamentos, tráfegos com o solo com teores de água inadequado ou ainda solos com sua estrutura totalmente depauperada.

Na Figura 14, estão apresentadas as curvas de compressibilidade (modelos de capacidade de suporte de carga) para o Latossolo Vermelho distrófico nas profundidades 1e 2 para o talhão I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>.



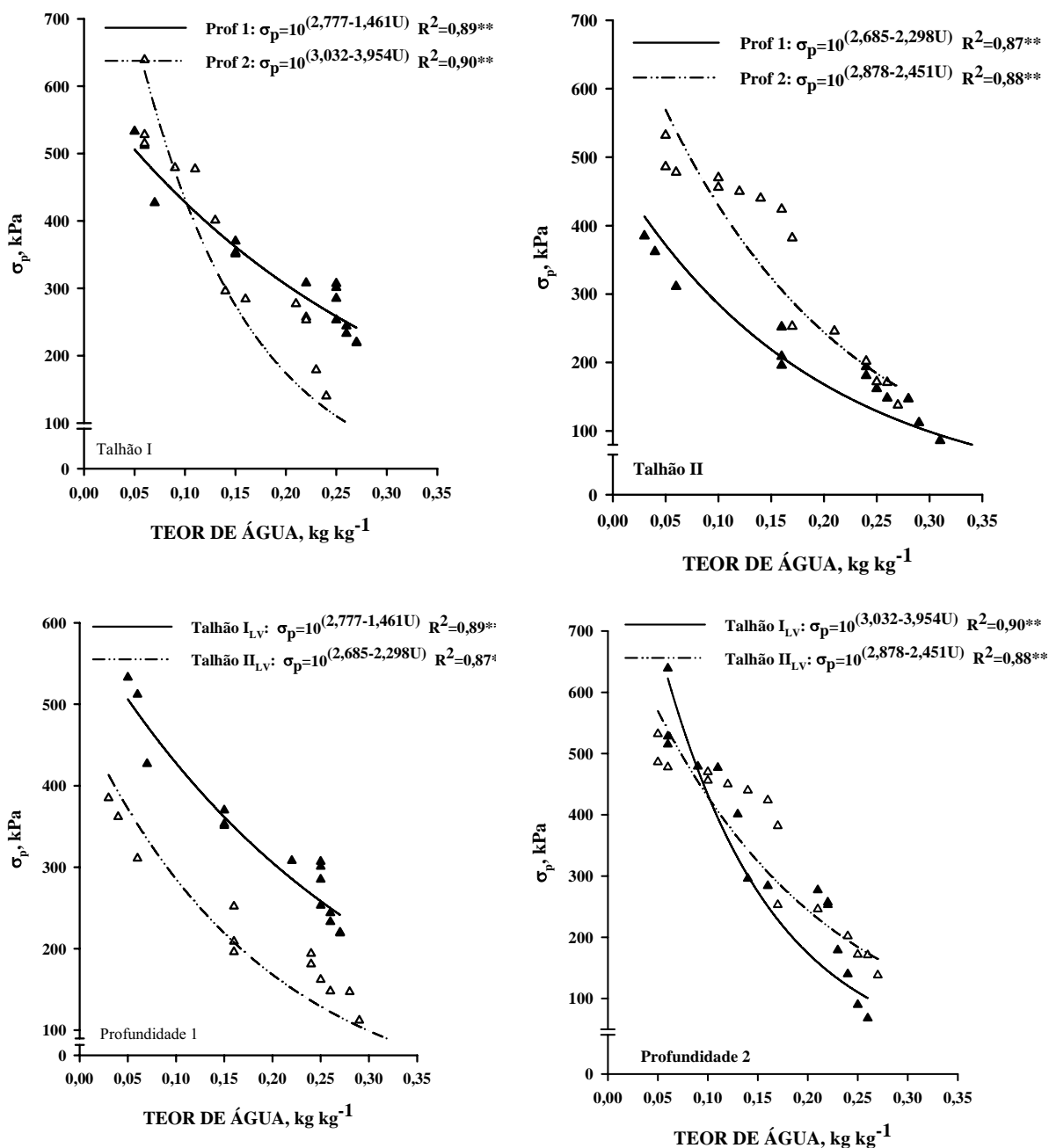


Figura 14. Modelos de capacidade suporte de carga de um Latossolo Vermelho distrófico, nas profundidades 1 e 2 para duas grades amostradas no talhão I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>.

A partir do comportamento das equações ajustadas a estes modelos (Quadro 7 e Figura 14), é possível identificar através da pressão de preconsolidação como

função da variação da teor de água do solo, e até que profundidade, talhão ou solo esteve mais consolidado, isto é, mais compactado. Por outro lado, também, os modelos obtidos podem prever quanto de cargas, isto é, que pressões de contato os solos avaliados poderão suportar, sem que teoricamente, as suas estruturas não venham a ser compactadas.

De maneira geral para o Latossolo Vermelho distrófico (Figura 14), em ambos os talhões a estrutura deste solo está muito consolidada, o que lhe confere uma elevadíssima CSCS. Isto reflete o histórico do manejo desta área, em especial, às elevadas pressões de contato aplicada pelos diferentes tratores, transbordo e colhedoras. No talhão II<sub>LV</sub>, os elevados valores de  $\sigma_p$  da profundidade 1 em relação aos valores da profundidade 2 diagnosticam, provavelmente a presença de uma região compactada ou denuncia a falta de eficiência de operações como um simples cultivo ou até mesmo de uma subsolagem. A variabilidade espacial com referência a estrutura desse solo ou a falta de homogeneidade durante a adoção do manejo se torna mais evidente quando se compara as curvas de compressibilidade entre grade para mesma profundidade. Na profundidade 1, os modelos além de diferirem estatisticamente (Quadro 7) são muito superiores os valores de  $\sigma_p$  do talhão I<sub>LV</sub> para todos os teores de água o solo foi submetido, enquanto na profundidade 2, isso ocorre até o teor de água de aproximadamente 0,10 Kg Kg<sup>-1</sup>. Em termos práticos, isso significa dizer que dentro de um mesmo talhão, este solo não tem a mesma CSCS, e que responderá diferenciadamente ao dimensionamento (em termos de pressões de contato) das máquinas e implementos utilizados durante o manejo da cultura.

No talhão VII<sub>R</sub>, as equações obtidas para as profundidades 1 e 2, também diferiram estatisticamente, muito provavelmente pelas justificativas já apresentadas ao talhão I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>. De acordo com a Figura 15, o comportamento dos modelos de CSCS do solo evidencia a influência impactante do tráfego e das ferramentas de preparo sobre esta classe de solo. Os valores de  $\sigma_p$  obtidos para a profundidade 2 são superiores estatisticamente aos valores obtidos para a profundidade 1, independente do teor de água que o solo esteja. Características como a granulometria, por exemplo, para este tipo de solo, devem ser levadas em consideração durante o seu manejo. A grande contribuição da areia, principalmente de areia fina, quando carregada ocorre um rearranjo das partículas nas camadas mais profundas, causando uma redução do espaço poroso, acirramento das partículas e elevando

sensivelmente a consolidação da estrutura. Em solos com essas características, principalmente, quando escarificado em condições de teor de águas extremas (muito úmido ou muito seco) o sucesso da operação é praticamente nulo. O impacto do manejo utilizado na cana-de-açúcar também pode ser visto quando se compara as curvas do talhão VII<sub>R</sub> com a área de referência VIII<sub>Rmata</sub>. Esta área, não apresenta histórico de manejo e, por conseguinte uma história de tensão. Em áreas como esta qualquer tráfego ocorrido com o solo acima de 0,10 Kg Kg<sup>-1</sup>, certamente provocaria deformações plásticas, consolidando indevidamente a estrutura do solo.

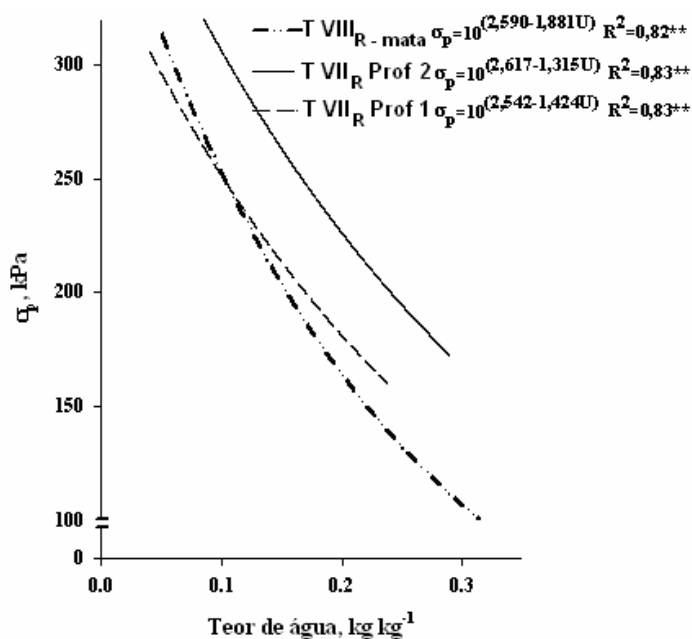


Figura 15. Modelos de capacidade suporte de carga de um Neossolo, nas profundidade 1 e 2 para o talhão VII<sub>R</sub> e uma área de referência VIII<sub>Rmata</sub>.

Os talhões (IV<sub>PV</sub>, V<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub>) avaliados no Argissolo Vermelho-amarelo, a exemplo do talhão (I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>), apresentaram uma elevada CSCS. Não foi verificada diferença significativa entre os modelos das profundidades 1 e 2 dos talhões IV<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub>. Neste caso, o conjunto de dados referente à  $\sigma_p$  e teores de água das duas profundidades são ajustados a uma nova equação como apresentado na Quadro 7 e Figura 16. No talhão V<sub>PV</sub>, os modelos diferiram e a profundidade 2 apresentou maior consolidação, como pode ser visto na Figura 16. Neste tipo de solos, a iluviação de teores de argilas do horizonte A para o

horizonte, torna este último, pedogeneticamente, mais adensado. Portanto, a igualdade estimada da CSCS entre as profundidades dos talhões  $IV_{PV}$  e  $VI_{PV}$ , provavelmente se deve a constituição de um material granulométrico mais grosseiro da camada superficial. Isto, além de conferir uma menor capacidade armazenamento de água, como constatado em laboratório no momento de equilibrar os teores de água, é comprovado pelos modelos. Pois, como é mostrado na Figura 16, o teor de água de saturação da profundidade 1, dos três talhões, não ultrapassou os  $0,35 \text{ Kg Kg}^{-1}$ , portanto baixa, se comparada aos teores de água obtidos nas amostras da profundidade 2.

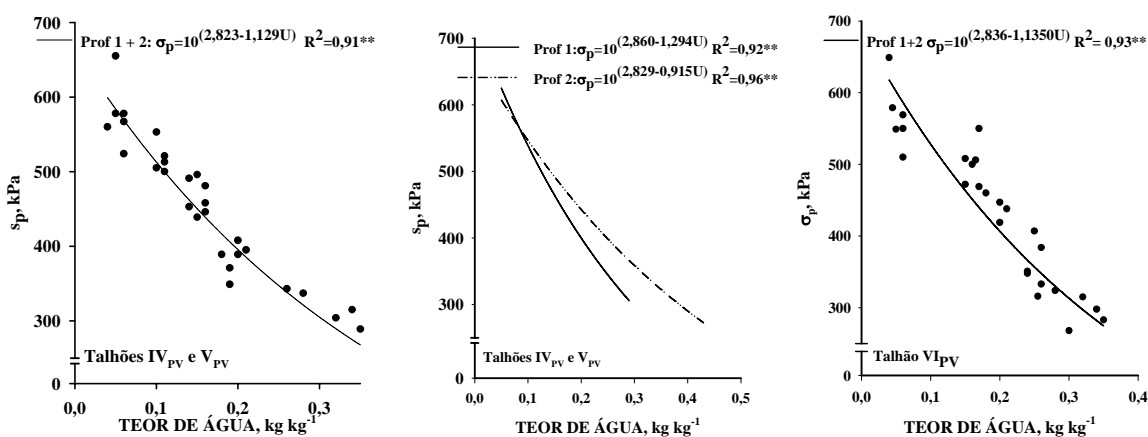


Figura 16. Modelos de capacidade suporte de carga de um Argissolo, para as profundidades 1 e 2 dos talhões  $IV_{PV}$ ,  $V_{PV}$  e  $VI_{PV}$ .

Quando se comparou as equações obtidas para cada grade dentro de cada profundidade (Quadro 7), nota-se que houve diferença apenas entre o talhão  $IV_{PV}$  e  $V_{PV}$  nas duas profundidades. Na Figura 17 está apresentado o comportamento das curvas para as equações ajustadas dos três talhões para as duas profundidades avaliadas. Como os talhões  $IV_{PV}$  e  $VI_{PV}$  não diferiram, um novo ajuste foi feito obtendo uma única equação para as duas profundidades. Em ambas as profundidades está claro a maior consolidação da estrutura do solo do talhão grade  $V_{PV}$  em relação aos talhões  $IV_{PV}$  e  $VI_{PV}$  do Argissolo Vermelho-amarelo (Figura 17). A única variante que explicaria isto seria a adoção de um manejo diferenciado para cada talhão, pois como se observa no Quadro 1, trata-se do mesmo solo, época de plantio, variedade e ciclo.

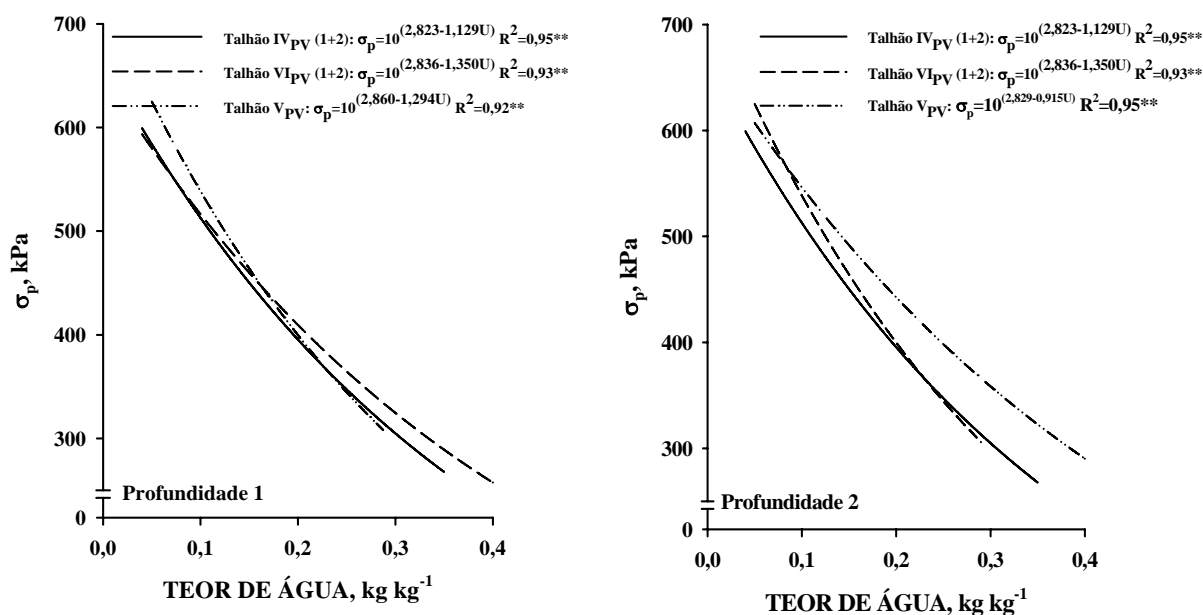


Figura 17. Modelos de capacidade suporte de carga de um Argissolo Vermelho-amarelo, nas profundidades 1e 2, para os talhões IV<sub>PV</sub>, V<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub>.

Para o Latossolo Vermelho (talhão III<sub>LV</sub>) também não foi verificada diferença significativa entre as equações ajustadas para as duas profundidades. Portanto, assim como a exemplo de outros talhões, os pares de dados de  $\sigma_p$  e de teor de água foram ajustados gerando-se e um novo modelo (Quadro 7 e Figura 18). Este solo é profundo, possui boa drenagem, é poroso e, portanto, suscetível a compactação quando submetidos tráfego inadequados. Os valores de  $\sigma_p$  apresentados são considerados elevados, e um agravante observado foi o baixo teor de água de saturação, o que não é condizente com as características físicas desse solo. Portanto, este tipo de comportamento denota uma presença de matéria orgânica fora dos padrões ou uma destruição da estrutura desse solo nas duas profundidades avaliadas, que vai além da profundidade de aradura. Os carregamentos empregados durante o tráfego e os preparos exaustivo solicitados no cultivo de cana-de-açúcar podem reduzir drasticamente a vida agrícola de um solo como este, se medidas mitigatórias não forem adotadas sistematicamente.

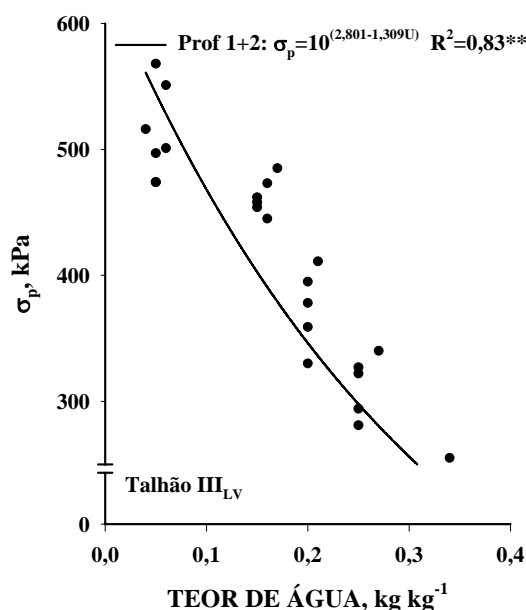


Figura 18. Modelo de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho para as profundidades 1 + 2 do talhão III<sub>LV</sub>.

### 6.3.1 Estatística descritiva e geoestatística da capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) sob diferentes teores de água para as duas profundidades avaliadas

O Quadro 8 ilustra os resultados da análise estatística descritiva realizada para a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) em diferentes teores de água em duas profundidades para o talhão III<sub>LV</sub>. É interessante salientar que os valores para os valores de assimetria e curtose foram calculados com os dados discrepantes inclusos na população. Pode-se verificar que os dados são heterogêneos, ou seja, os dados apresentam grande variabilidade. Baseados nos Limites Superiores e Inferiores para cada atributo, foram determinados os dados discrepantes no conjunto de dados, os quais não foram considerados nas respectivas análises geoestatísticas.

Quadro 8. Resultados da análise estatística descritiva realizada para a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) e em diferentes teores de água em duas profundidades estudadas.

	TEOR DE ÁGUA					
	0,05 Kg Kg <sup>-1</sup>		RF		SATURADA	
	PROFUNDIDADE 1			PROFUNDIDADE 2		
Média	435	340	291	504	319	228
Quartil Superior	461	398	331	541	418	270
Quartil Inferior	407	244	234	436	227	198
Amplitude Interquartil	54,8	154	97	105	191	71
Limite Superior	543	628	477	699	705	376
Limite Inferior	324	13	88	278	-60	92
Simetria	-2,2	0,6	0,5	1,4	0,0	-0,5
Curtose	8,5	0,1	-0,3	2,3	-1,4	1,9

RF = Região de Friabilidade.

O Quadro 9 ilustra o resultado da análise geoestatística para os dados de capacidade de suporte de carga do solo para o talhão III<sub>LV</sub> e em diferentes teores de água. Estão listados todos os parâmetros que foram utilizados para seleção do melhor modelo do variograma e para a interpolação e geração dos mapas por krigagem.

Quadro 9. Modelos e parâmetros, referentes aos variogramas ajustados, para os valores de capacidade de suporte de carga obtidos para o talhão III<sub>LV</sub> e em diferentes teores de águas.

	Parâmetros dos modelos ajustados				Co/Co+C (%)
	Modelo	Co <sup>1</sup>	C+Co <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	
U 0,05 Kg Kg <sup>-1</sup> - 1	Esférico	1	1778	50	0,1
U 0,05 Kg Kg <sup>-1</sup> - 2	Esférico	1000	5418	83	18,5
U RF - 1	Esférico	10	10590	66	0,1
U RF - 2	Esférico	10	9650	71	0,1
U SAT - 1	Esférico	1116	3484	123	32,0
U SAT - 2	Esférico	652	2374	116	27,5

<sup>1</sup> Efeito pepita, <sup>2</sup> Patamar, <sup>3</sup> Alcance. U = teor de água, RF = Região de Friabilidade, SAT = Saturação, 1 = Profundidade de 0,0 a 0,025 m e 2 = Profundidade de maior resistência à penetração.

O grau de dependência espacial dos variogramas ajustados foi considerado forte ( $Co/Co+C < 25\%$ ) para quase todos os atributos estudados, exceto para a capacidade de suporte de carga do solo no teor de água de saturação (para ambas as

profundidades) que obteve um grau de dependência espacial moderado ( $25 \% < Co/Co+C < 75 \%$ ). O modelo que se mostrou mais adequado para explicar a estrutura da variabilidade espacial dos atributos mapeados foi o esférico (Figura 19).

Analisando os resultados obtidos do alcance dos variogramas da CSCS na Região de Friabilidade no Quadro 9, observa-se que até uma distância amostral 66 m é adequada para o mapeamento deste atributo na camada superficial e acima desta distância amostral aconselha-se a trabalhar com zonas de manejo (considerando-se as características e propriedades pedológicas do solo estudado). Para a profundidade 2, esta distância amostral limite é de 71 m.

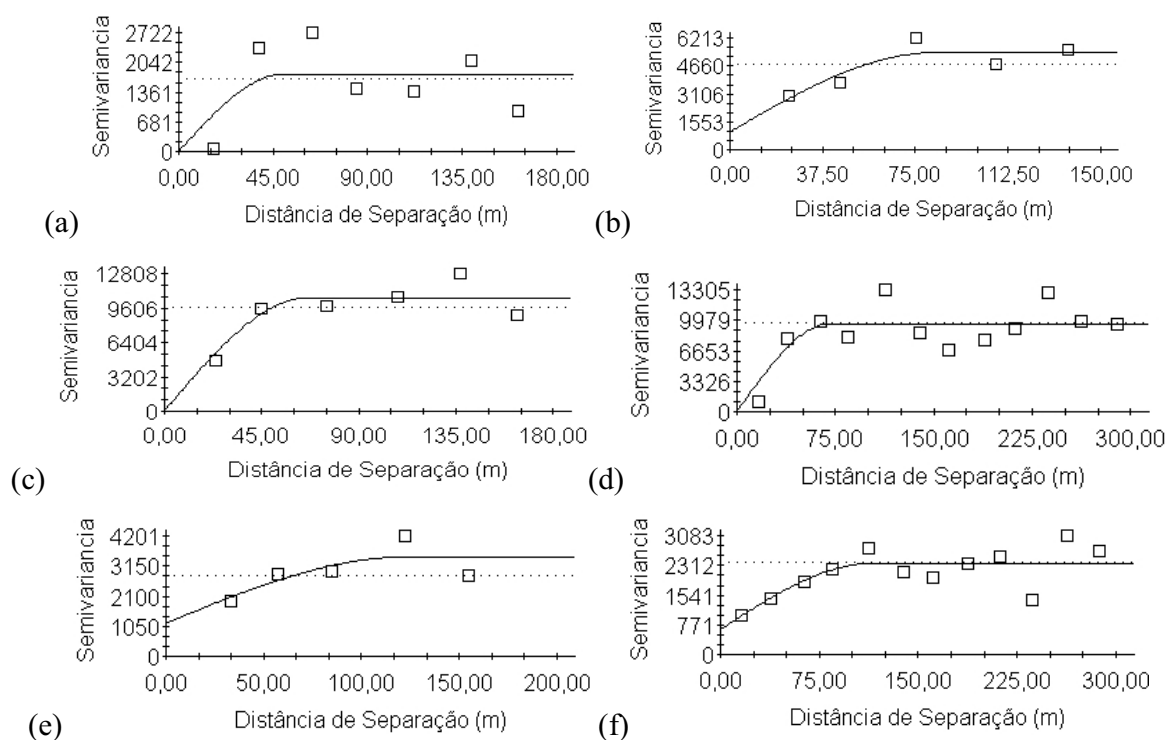


Figura 19. Variogramas referentes a capacidade de suporte de carga obtidos para o talhão III<sub>LV</sub> e em diferentes teor de água (a) Teor de água de 0,05 Kg Kg<sup>-1</sup> profundidade 1, (b) Teor de água de 0,05 Kg Kg<sup>-1</sup> profundidade 2, (c) Teor de água Região de Friabilidade profundidade 1, (d) Teor de água Região de Friabilidade profundidade 2, (e) Teor de água de Saturação profundidade 1 e (f) Teor de água de Saturação profundidade 2.



### 6.3.2 Mapas da capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) para diferentes teores de água e em duas profundidades

A distribuição espacial da CSCS do Latossolo Vermelho na profundidade 1 e 2 em função dos estados de consistência do solo podem ser vista nas Figuras 20, 21 e 22, obtidos por krigagem. Em ambas as profundidades a CSCS, avaliada pela  $\sigma_p$ , reduz-se com o aumento do teor de água no solo. Isto evidencia a suscetibilidade deste solo à compactação por carregamentos, quando forem aplicados de modo a não respeitar a CSCS estimada em função de cada região de consistência (tenacidade, friabilidade e plasticidade) do solo. Mapas como estes podem orientar o tráfego na área, e o produtor poderá em função destas informações decidir que parte da área poderia ser trafegada e que tipo de dimensionamento (pressão de pneu, tipo de pneus, carga nos rodados) a máquina/implemento poderia usar. Uma situação comum nas áreas canavieiras, por exemplo, é que na época da colheita depois de uma chuva é decidir que área, ou talhão deve ser colhido, isto porque a variação de granulometria dentro e entre os talhões é variável. Portanto, há sempre áreas que o processo de infiltração de água é mais rápido, tornando “apto” a área ao trabalho. Para manter a sustentabilidade da estrutura deste talhão todo e qualquer manejo que solicite o emprego de carregamentos ao solo, deverá ser com o solo na condição tenaz, o que limitaria significativamente o manejo desta área, pois se sabe que com o solo nesta condição, é praticamente impossível qualquer tipo de preparo e restando apenas a função de tráfego. Por outro lado, quando o solo estiver nos outros estados de consistência, o talhão III<sub>LV</sub> não terá CSCS para receber os carregamentos que atualmente estão sendo empregados, restando, neste caso, redimensionar o parque de máquinas .

A Figura 20 mostra que a maior capacidade suporte de carga da estrutura da profundidade 2 é evidenciada, com valores de 700 a 800 kPa, enquanto na profundidade 1 os maiores valores de  $\sigma_p$  ficaram em torno de 400 a 500 kPa, com pequenas manchas de 600 kPa. Neste tipo de estudo, o conhecimento da  $\sigma_p$  seria um importante recurso para estimar a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) de camadas superficiais (profundidade 1), onde de fato há a interação pneu/solo, enquanto que em camadas subsuperficiais (profundidade 2), a  $\sigma_p$  seria uma forte indicadora da consolidação da estrutura do solo, ajudando a identificar

e localizar regiões compactadas, auxiliando na definição de profundidades de subsolagens, escarificações, e de aração.

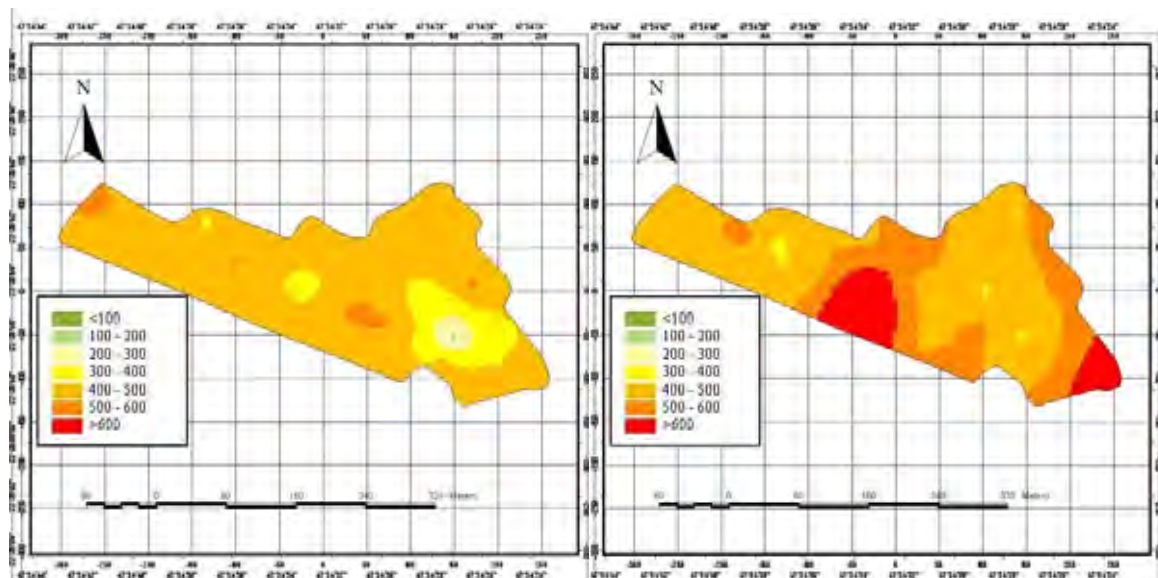


Figura 20. Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$  - kPa) do Talhão III<sub>IV</sub>, na região de consistência de tenacidade em função das duas profundidades avaliadas.

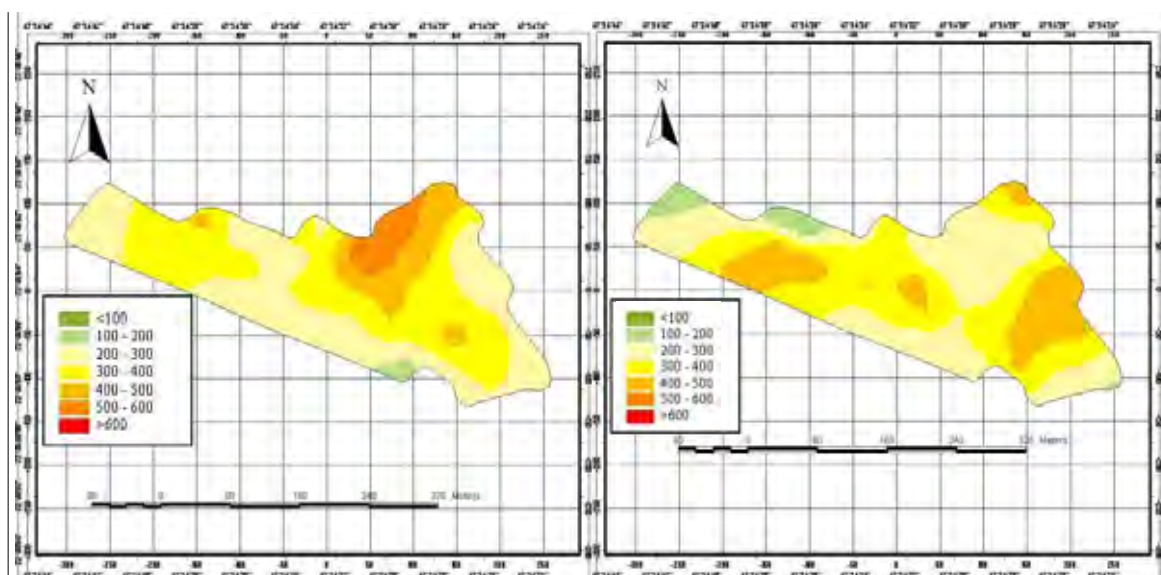


Figura 21. Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$  - kPa) do Talhão III<sub>IV</sub>, na região de consistência de friabilidade em função das duas profundidades avaliadas.

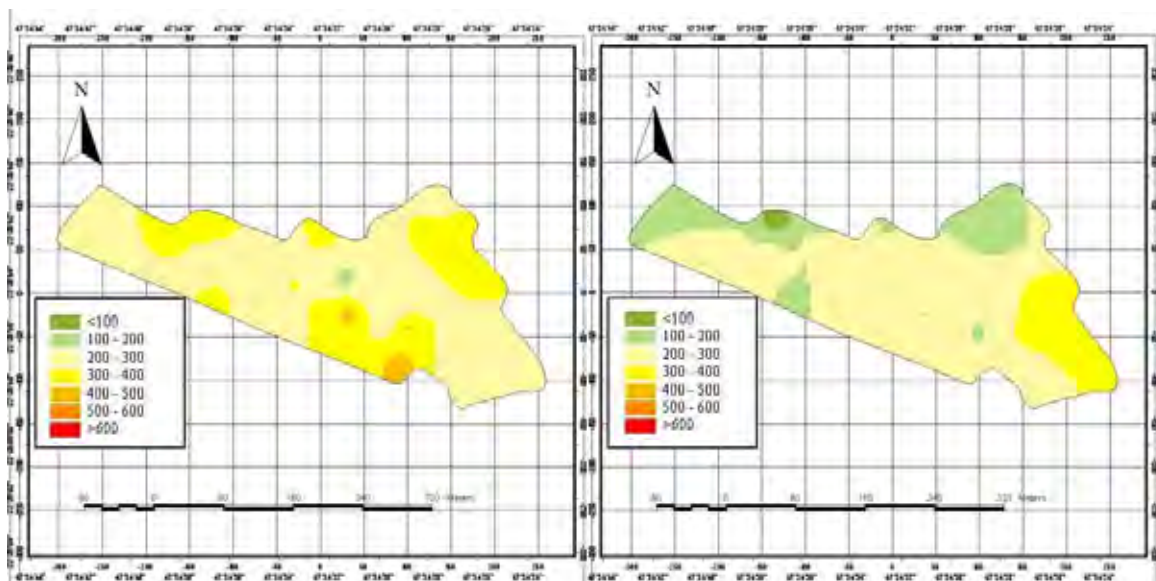


Figura 22. Variabilidade espacial da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$  - kPa) do Talhão III  $LV$ , na região de consistência de plasticidade em função das duas profundidades avaliadas.

#### 6.4 Mapas de Índice de Cone (IC)

A avaliação da resistência do solo à penetração foi feita nos talhões  $I_{LV}$ ,  $II_{LV}$ ,  $III_{LV}$ ,  $IV_{PV}$ ,  $V_{PV}$ ,  $VI_{PV}$ ,  $VII_R$  e  $IX_R$ . A distribuição espacial, bem como a variabilidade espacial do índice de cone (IC) nas profundidades de 0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; e  $> 0,4$  m, é apresentada a seguir nos mapas de isocompactação (Figuras de 23 a 28). De maneira geral, o índice de cone variou em profundidade, e entre solo, podendo o estágio de implementação da cultura (número de ciclos) ter sua parcela de contribuição.

No talhão  $I_{LV}$  e  $II_{LV}$  (Figura 23), onde a cultura está no seu 3º ciclo, o IC atingiu valores de até 4000 kPa. Apesar de incrementos crescentes em profundidade, verifica-se que foi nas profundidades de 0,3 a 0,4 m e acima de 0,4 m (Figuras 23d e 23e) que foram registrados os maiores valores de IC. De acordo com estes dois mapas, fica evidenciada uma maior resistência mecânica naquelas profundidades, o que pode estar associado ao tráfego contínuo no manejo da cultura e, ou ainda, à ineficiência de operações com fins de

mobilização e descompactação da área. Um outro fato que chama a atenção foi a proporção e a distribuição localizada do IC em quase todo o talhão, indicando existência de manchas com maior resistência mecânica.

No talhão VII<sub>R</sub>, a cultura também está no 3º ciclo, entretanto, o solo foi classificado como Neossolo Quartzarênico (R). Os valores de IC, a exemplo do que ocorreu no talhão I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>, apresentaram valores próximos e variou de forma crescente em profundidade (Figura 24). A partir de 0,2 m de profundidade os valores de IC alcançaram os 3500 kPa, diferindo do talhão I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>, onde os valores como este foram registrados só a partir 0,3 m, e com maior intensidade aos 0,4 m de profundidade. Uma provável explicação seriam as características morfológicas dos solos pertencentes a essa classe que, por serem muitos rasos, com o horizonte A seguido de Rocha (R) conferem uma pequena espessura de *solum*, dificultado a penetração do sistema radicular. Neste talhão, outras investigações e relações deverão ser estabelecidas, e antes de atribuir o efeito maléfico à estrutura desses solos ao tráfego, dever-se-á conhecer a sua capacidade de suporte natural. Neste contexto as informações referentes a textura, densidade do solo inicial ( $D_{s_i}$ ) e a pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ), determinada em área natural (referência) e sob a cultura, serão de grande valia.

Os talhões IV<sub>PV</sub>, V<sub>PV</sub> e VI<sub>PV</sub> apresentaram os maiores valores de IC (Figuras 25 e 26). Em algumas regiões, como se observa no talhão IV<sub>PV</sub> e V<sub>PV</sub>, na profundidade acima de 40 cm, foram encontrados valores da ordem de até 7000 kPa. Nestes dois talhões, apesar dos incrementos gradativos nos valores de IC quando se aprofunda no perfil do solo, as faixas IC de 2000 a 5000 kPa nas camadas de 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m ilustram bem a influência do horizonte B textural presente nesta classe de solo.

No Talhão III<sub>LV</sub> (Figura 27), onde se encontra um outro Latossolo Vermelho, portanto, do ponto de vista estrutural, muito distinto do Latossolo do Talhão I<sub>LV</sub> e II<sub>LV</sub>, talvez este seja o melhor exemplo (ou situação) do impacto das operações de preparo e tráfego agrícola utilizados na cana-de-açúcar.

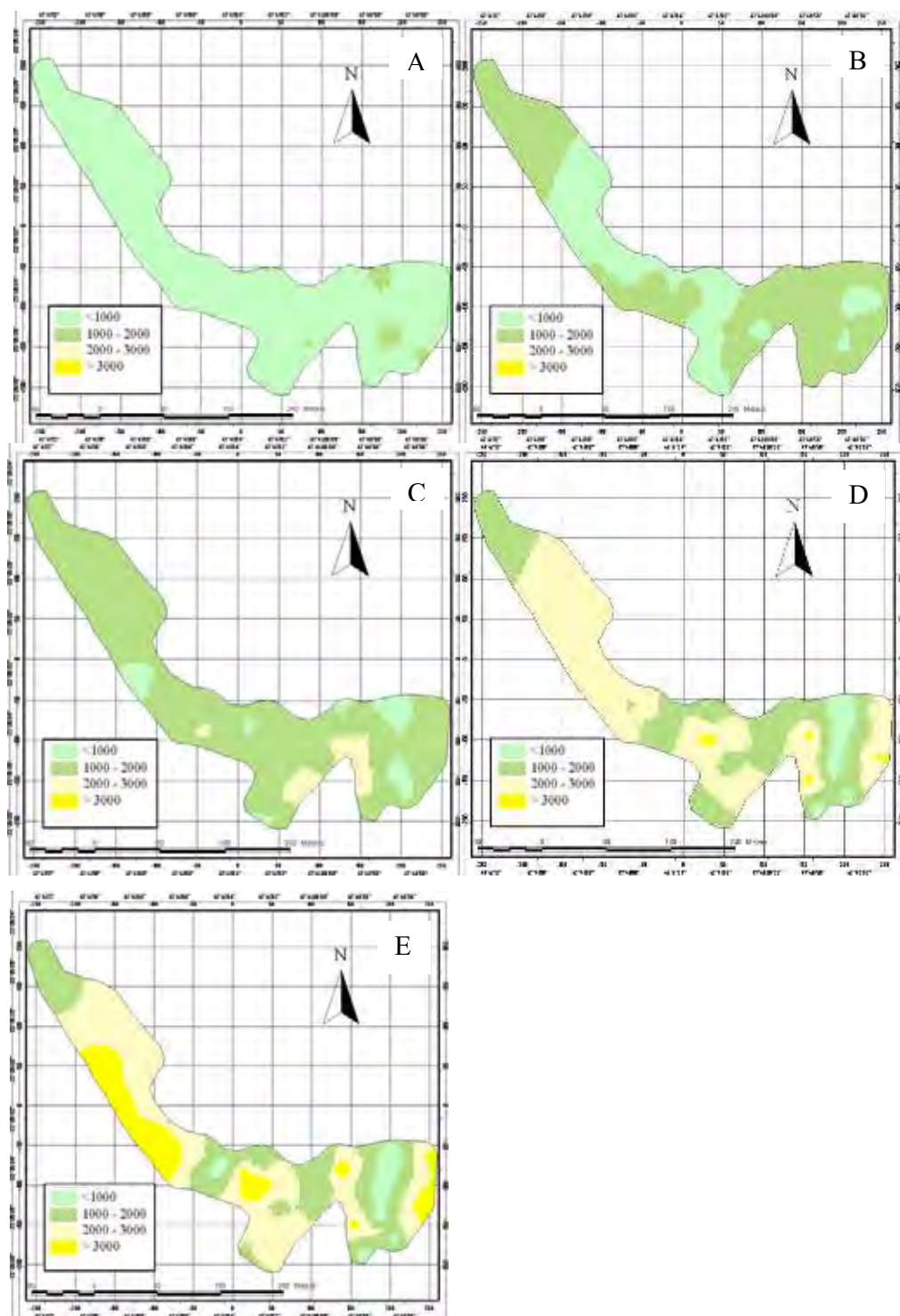


Figura 23. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Latossolo Vermelho, nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão  $I_{LV}$  e  $II_{LV}$ .



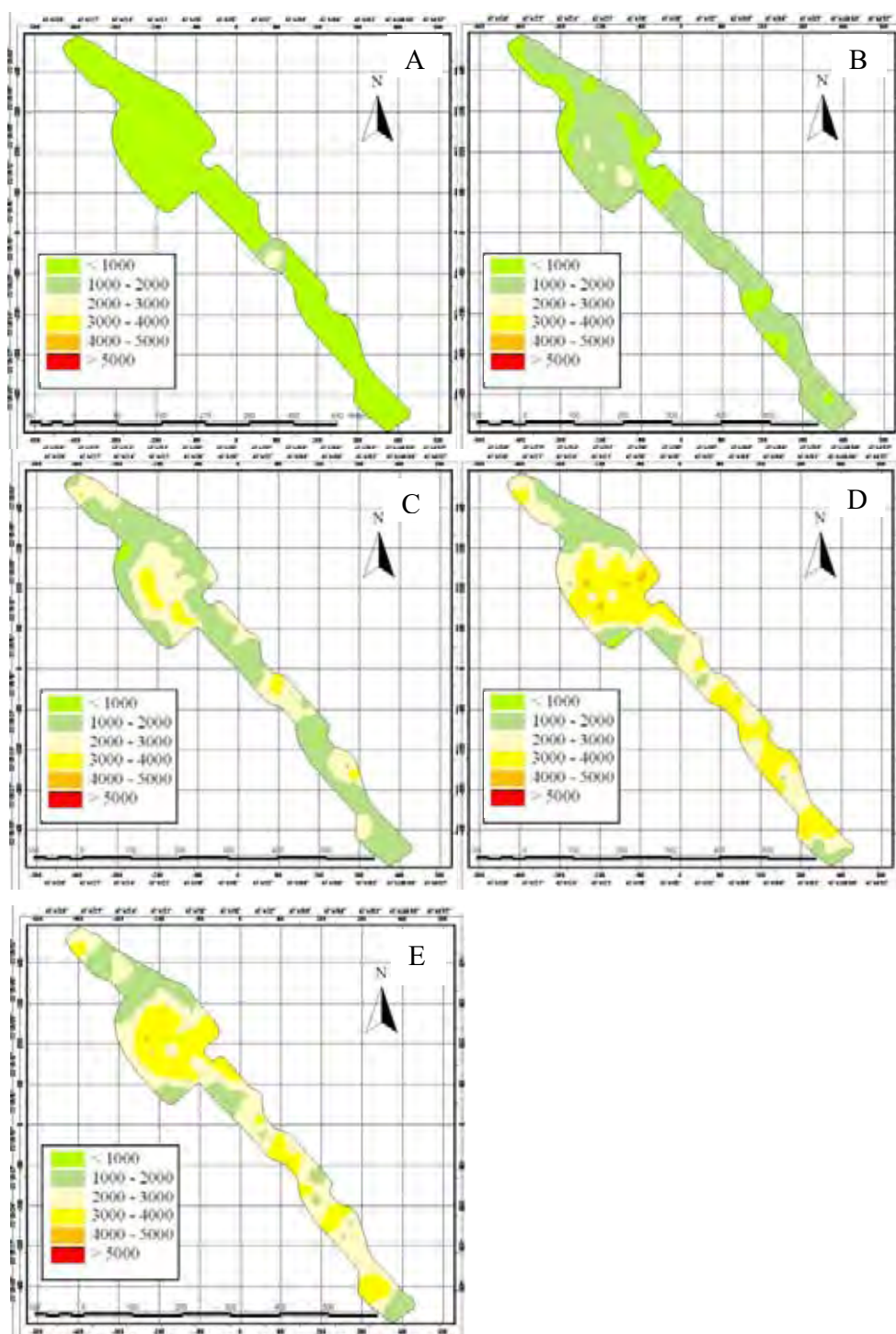


Figura 24. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Neossolo Quartzarênico (R), nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão VII<sub>R</sub>.

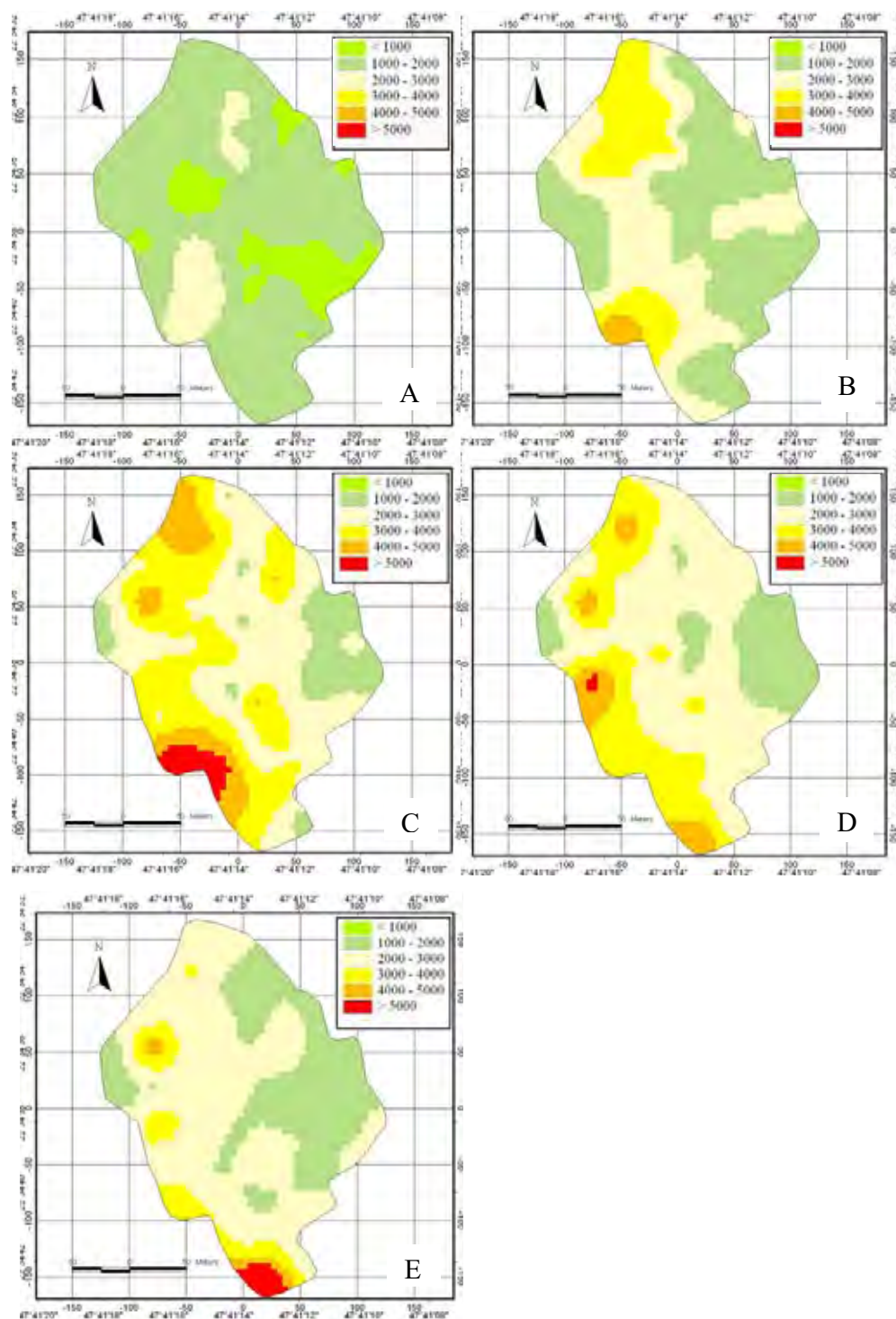


Figura 25. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Argissolo Vermelho-amarelo (PV), nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão  $IV_{PV}$  e  $V_{PV}$ .

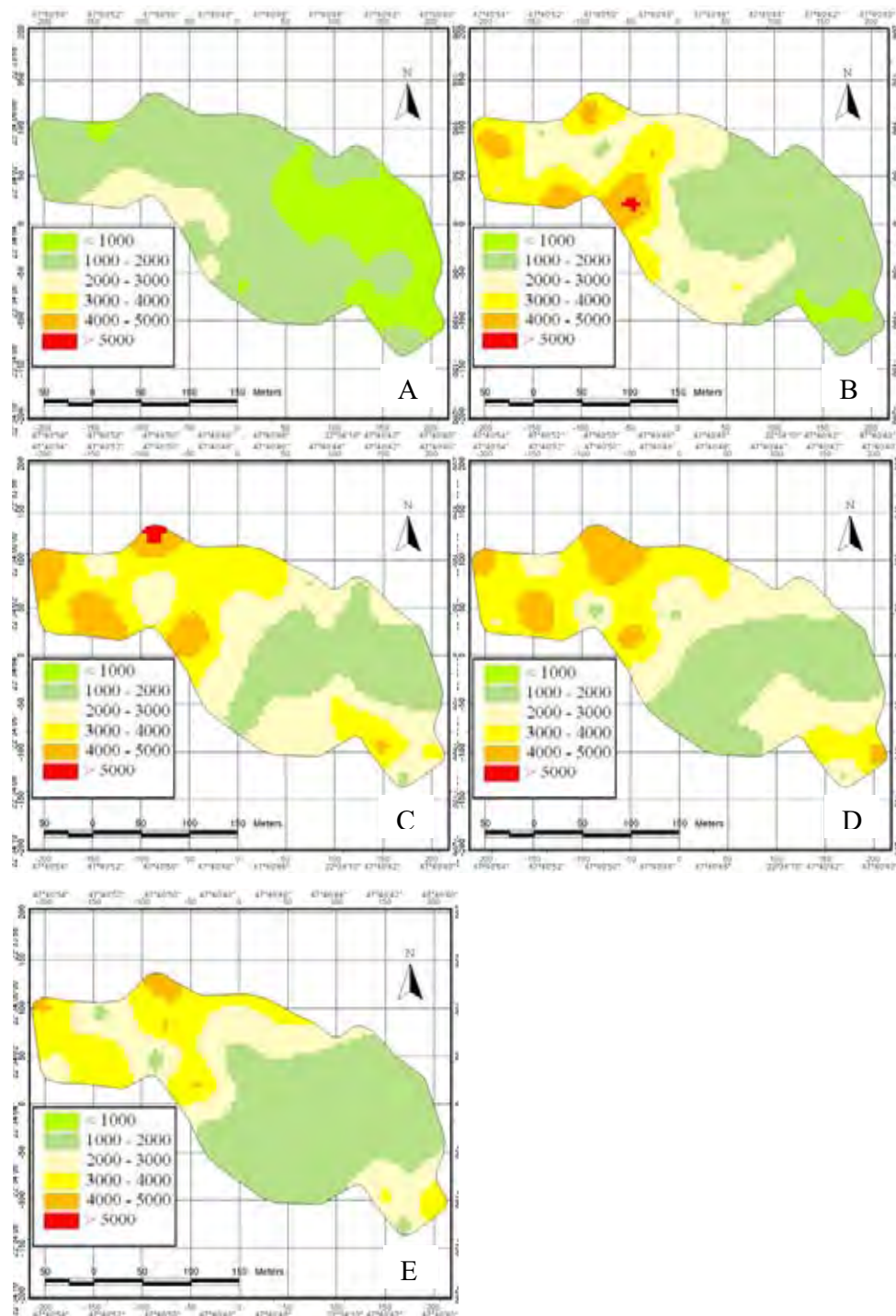


Figura 26. Espacialização do índice de Cone (IC - kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Argissolo Vermelho-amarelo, nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do talhão VI<sub>pv</sub>.



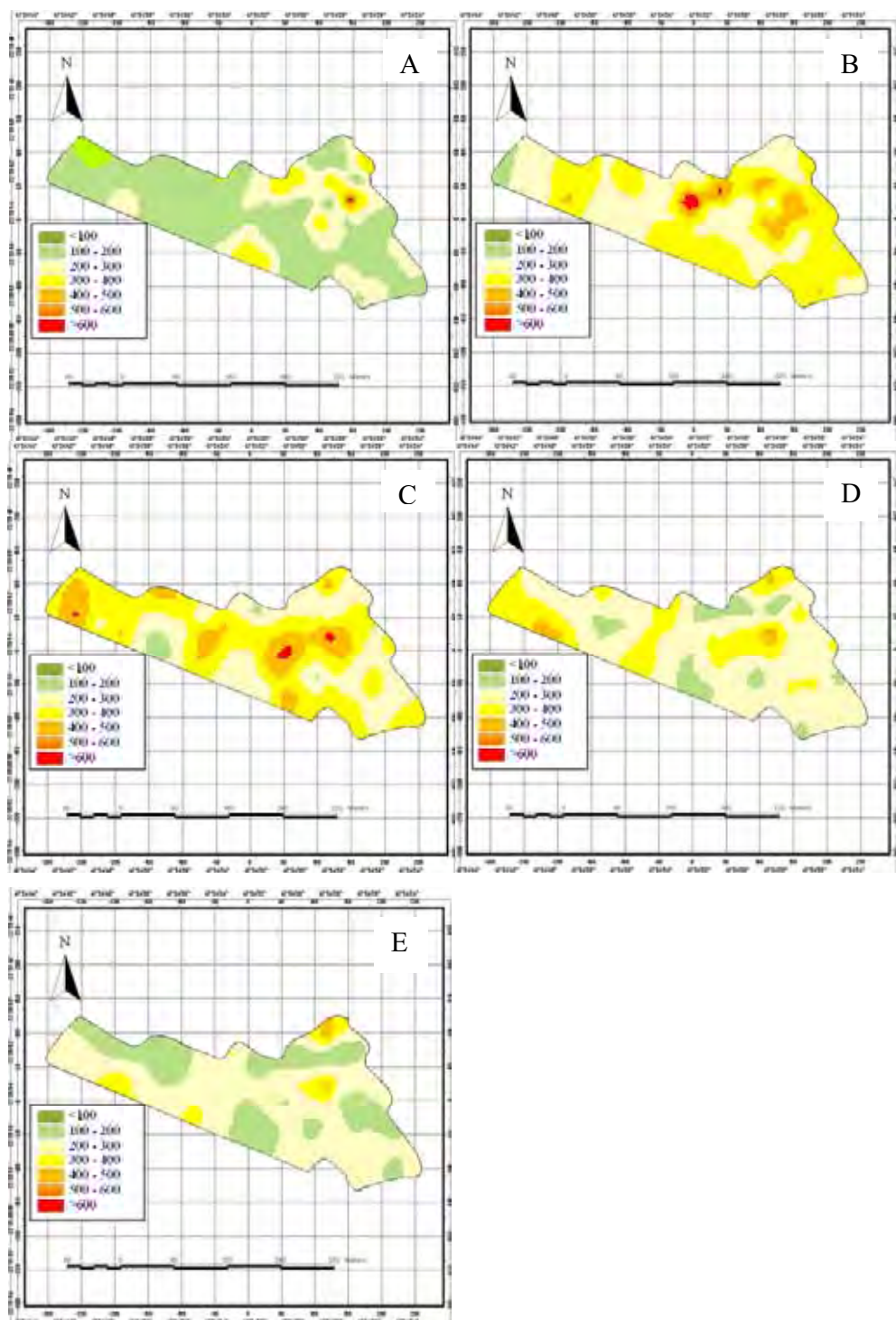


Figura 27. Espacialização do índice de Cone (IC . kPa) na linha de tráfego de uma área sobre Latossolo Vermelho nas profundidades de 0-0,1(A), 0,1-0,2(B), 0,2-0,3(C), 0,3-0,4(D) e >0,4(E) m no do Talhão III<sub>LV</sub>.

## 7 CONCLUSÕES

Os modelos obtidos de capacidade de suporte de carga dos solos em função pressão de preconsolidação e do teor de água foram sensíveis na identificação da degradação da estrutura, identificando camadas e áreas de maior resistência mecânica, assim como, possíveis irregularidades quanto a homogeneidades das operações de preparo do solo no talhão.

A utilização da geoestatística e do mapeamento dos atributos estudados revelou-se uma ferramenta promissora para tomada de decisões em sistemas de uso do solo com a cultura de cana-de-açúcar, visando, sobretudo a sustentabilidade da estrutura do solo.

A obtenção de mapas de capacidade de suporte de carga constituiu em uma ferramenta eficiente na predição da capacidade de suporte de carga do solo e na localização de áreas estruturalmente comprometidas. Estas informações são úteis para orientar os técnicos na tomada de decisões de realizações das operações mecanizadas.

O índice de cone (IC) mostrou-se um indicador sensível na avaliação da resistência mecânica dos solos cultivados com cana-de-açúcar.

Os mapas da variabilidade espacial de isocompactação, elaborados a partir de recursos geoestatísticos, podem ser utilizados como importantes ferramentas na localização de regiões estruturalmente comprometidas, permitindo em manejos futuros a melhor adequação das operações mecanizadas destinadas a descompactar o solo.

## 8 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ABREU, S.L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um argissolo**. Santa Maria, 2000. 65p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria.

AL-ADAWI, S.S.; REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. **Transactions of ASAE**, v.39, p.1641-9, 1996.

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.151-157, 1996.

ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FLORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.19, n.1, p.115-119, 1995.

ASHBURNER, J.E.; SIMS, B.G. **Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza**. 1.ed. San José: IICA, 1984. 473p.

ASSIS, R.L. de. **Avaliação dos atributos físicos e da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa.** Botucatu, 2002. 106p. Tese (Doutorado) – FCA/UNESP.

BAIO, F.H.R. **Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas.** Piracicaba, 2001. 113p. Dissertação (Mestrado) – ESALQ/USP.

BARBIERI, J.L.; POLI, D.M.; DONZELLE, J.L. **Os latossolos roxos e a cana-de-açúcar.** São Paulo: Coopersucar, 1985. 12p. (Boletim Técnico, n. 32).

BARBOSA, A.J.; VIEIRA, B.L.; DIAS, P.G.; DIAS JÚNIOR, M.S. Desempenho operacional de um trator agrícola equipado alternadamente com pneus radiais e diagonais. **Eng. Agríc.**, v.25, n.2, p.474-480, 2005.

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

BERG, M.V.D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. **R. Bras. Ci. Solo**, v.21, p.393-399, 1997.

BERTOLANI, F.C.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, p.987-995, 2001.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesq. Agro. Brás.**, v.38, p.849-856, 2003.

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

BOWLES, J.A. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986. 647p.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Physical and mineralogical methods. 2ed. Madison: ASA, 1986. p.1124-1135.

BRAUNACK . M.V.; CREES, L.R.; HOGARTH, D.M. Soil strength changes in trials using two type option on haulout trucks. In: CONFERENCE OF THE AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS. Ballina, 1998. **Proceedomgs...** Ballina: ASSC, 1998. p.232-238.

BURROUGH, P.A.; VAN GAANS, P.F.M.; HOOTSMANS, R. Continuous Classification in Soil Survey: spatial correlation, confusion and boundaries. **Geoderma**, v.77, p.115-135, 1997.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. Mapas e suas representações computacionais. In: ASSAS, E.D.; DANO, E.E. (Ed.) **Sistema de informações geográficas**. Brasília: Embrapa, 1998. cap.2, p.13-29.

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

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A C.; JORGE, L.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas**. Campinas: IAC, 1986. 93p. (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.

CARANACHE, A. Penetrometric, a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Til. Res.**, v.16, p.51-70, 1990.

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

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.37, n.8, p.1151-9, 2002.

CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. Cambridge, 1936. **Proceedings...** Cambridge, ICSMFE, 1936. v.3. p.60-64.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas**. Botucatu, 2001. 155p. Tese (Doutorado) – FCA/UNESP.

CASTRO NETO, P.; LANÇAS, K. P. ; NAGAOKA, ALBERTO K. Sistema para avaliação da compactação do solo em áreas de reforma da cultura da cana-de-açúcar. **Agrosóf**, v. 8, p. 14, 1999.

CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.23, n.4, p.997-1003, 1999.

CESAR, M.A.A.; DELGADO, A.A.; CAMARGO, A.P. de; BISSOLI, B.M.A.; SILVA, F.C. da. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.6, p.32-38, 1987.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.7, p.323-327, 1983.

COUTO, E.G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do estado de Mato Grosso. **R. Bras. Ci. Solo**, v.24, p.29-140, 2000.

COUTO, E.G.; KLAMT, E. Variabilidade Espacial de Micronutrientes em Solo sob Pivô Central no Sul do Estado do Mato Grosso. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.34, n.12, p.2321-2339, 1999.

COX, S. M.; WARDLAW, M.C. Grade soil sampling to determine manageable physical and chemical properties affecting soybean production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, St. Paul, 1998, **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 1999. p.327-33.

CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam Haplaquoll. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.51, p.562- 567, 1987.

DALLA ROSA, A. **Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo, Solo Santo Ângelo (Latossolo Roxo distrófico)**. Porto Alegre, 1981. 138p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

DENARDIN, J.E.; KOCHHAM, R.A. Requisitos para implantação e a manutenção do sistema de plantio direto. In: EMBRAPA, FUNDAÇÃO ABC. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. p.19-27.

DIAS, F.L.F. **Relação entre a produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na Região Noroeste do Estado de São Paulo**. Piracicaba, 1997. 64p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

DIAS JUNIOR, M.S. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 1999. 161p.

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

DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; SILVA, A.R.; FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **R. Árvore**, v.23, p.371-380, 1999.

DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; WINTER, M.E.; PIRES, J.V.G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. **R. Árvore**, v. 27, n. 3, p. 343-349, 2003.

DIAS JUNIOR, M.S.; MIRANDA, E.É.V. de. Metodologia para a determinação do limite de Contração-Modificada. **Cie. e Agr.**, v.22, p.313-317, 1998.

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

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

DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S.; LEITE, F.P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **R. Bras. Ci. Solo**, v.28, p.805-810, 2004.



- DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. 1.ed. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informações, 1999. 412p.
- FERNANDES, B., GALLOWAY, H.M. Efeito das rodas do trator em propriedades físicas de dois solos. **R. Ceres**, v.34, n.196, p.562-568, 1987.
- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D.; MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludaf). **R. Bras. Ci. Solo**, v.7, p.329-333, 1983.
- FIGUEIREDO, L.H.A. **Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo**. Lavras, 1998. 68p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras.
- 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.
- FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Til. Res.**, v.48, p.21-35, 1998.
- FREITAS, G. R. Preparo do Solo. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar – cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. cap.3, p271-83.
- GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A.B. RODRIGUES, J.E.; MARINO, L.; MATTIELLO, F. **Ensaios de laboratório em geologia**. São Carlos: USP, 1980. 134p.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; VIEIRA, S.R. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.485-495, 1999.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de características físicas do solo avaliadas em uma parcela experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. **Anais...** Viçosa: CBCS, 2003.

GROHMAMN, F.; QUEIROZ NETO, J.P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. **Bragantia**, v.25, p.421-431, 1966.

GS+. **Geostatistics for the Environmental Sciences**. Michigan: Gamma Design Software, 2000.

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

GYSI, M. Compaction of an Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil Till. Res.**, v.61, p.133-142, 2001.

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.

HALL, G.F.; OLSON, C.G. Predicting variability of soils from landscape models. In: MAUSBACH, M.J.; WILDING, L.P. **Spatial variabilities of soils and landforms**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p.9-25. (SSSA Special Publication, 28)

HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. **Aust. J. of Agr. Res.**, v.40, p.497-508, 1989.

HILLEL, D. **Introduction to soil physic**. San Diego: Academic, 1982. 364p.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Til. Res.**, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.

HUMBRET, R.P. **The growing of sugar cane**. New York: Elsevier, 1968. 779p.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA; R.M. **Applied geostatistics**. 1.ed. Oxford: Oxford Universit Press, 1989. 561p.

JORGE, J. A. **Compactação do Solo: causa, consequência e maneiras de evitar a sua ocorrência**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 22p. (Circular Técnico).

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejos do solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **Cie. Rur.**, v.25, n.3, p.395-398, 1995.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Eng. Agríc.**, v.18, p.45-54, 1998.

KONDO, M.K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. Lavras, 1998. 105p. Dissertação (Mestrado) – UFLA.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.211-218, 1999a.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Estimativa do efeito do uso e da umidade do solo sobre a compactação adicional de três Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.497-506, 1999b.

KUNZ, M.; COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, JM.; PELLEGRINI, A.; KAISER, D.R.; SANTI, G.R. Produtividade e desenvolvimento do feijoeiro em diferentes estados de compactação do solo induzido pelo tráfego de máquinas e escarificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. **Anais...** Viçosa: SBCS, 2003.

LANÇAS, K. P. **Desempenho Operacional de Pneus Radiais em Função da Pressão de Inflação, da Lastragem e do Deslizamento das Rodas de Tratores Agrícolas**. Botucatu, 1996. 170p. Tese (Livre Docência) – FCA/UNESP.

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.

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.

LEBERT, M.; BURGER, N.; HORN, R. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. (Ed.). **Mechanics related process in structured agricultural soils**, 1989.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Til. Res.**, v. 19, p. 275-286, 1991.

- LEPSCH, I.F. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p.83-98.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da teor de água gravimétrica de um solo hidromórfico. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20, p.1-12, 1996.
- MACHADO, A.L.T.; TREIN, C.R.; BICA, A.V.D.; BOENI, M. Desenvolvimento e aplicação de um penetrógrafo eletrônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, Pelotas, 1999. **Anais...** Pelotas: SBEA, 1999. (CD ROM)
- MAIA J.L.T.; RIBEIRO M.R. Propriedades de um argisolo amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.39, n.1, p.79-87, 2004.
- MAGALHÃES, P.S.G. Manejo do solo e seus efeitos sobre a compactação. In: SILVEIRA, G. M. da. (Ed.). **IV ciclo de estudos sobre mecanização agrícola**. Jundiaí: Fundação Cargil, 1990. p.156-167.
- MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão e sua organização no Brasil. In MANTOVANI, E.C. (Ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p.79-92.
- MANTOVANI, E.V. Compactação do solo, máquinas e implementos agrícolas. **Inf. Agr.**, v.13, n.147, p.17-32, 1987.
- MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neoceno-zóico, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, v.19, n.2, p.265-81, 2000.
- MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA JR., G.B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Sci. Agr.**, v.58, n.2, p.295-301, 2001.

McGARRY, D.; BIGWOOD, R.D.; PILLAI, U.P.; BRAY, S.G.; MOODY P.W.; WILSON, J. R. Effect of long term cane production on soil properties of a gleyed podsollic soil near Bundaberg, Queensland. In: SUGAR 2000 SYMPOSIUM, Brisbane, 1996. **Proceedings...** Brisbane: CSIRO. 1996, p.251-253.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **R. Bras. Ci. Solo**, v.59, p.783-789, 2003.

MIRANDA, E.E.V. **Avaliação da sustentabilidade da estrutura de um Latossolo sob cultivo de cafeeiro na região dos cerrados**. Lavras, 2001. 57p. Dissertação (Mestrado) – UFLA.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma terra roxa estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Eng. Agr.**, v. 16, n. 2, p. 31-41, 1996.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2001. 250p.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J.S. The State of Site Specific Management for Agriculture. **Adv. in Agr.**, v.42, p.1-18, 1997.

NOVAK, L.R. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho- Escuro Álico, em dois níveis de teor de água. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.27, p.1587-1595, 1992.

OLIVEIRA, G.C. **Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por 20 anos no cerrado**. Lavras, 2002. 78p. Tese (Doutorado) – UFLA.

OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E.; LUNA, J.G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.783-789, 1999.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETO, R.; MURAOKA, T.; ZOTELLI, H.B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.16, n.6, p.30-33, 1998.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WODEK, S. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil and Til. Res.**, v.19, p.131-143, 1998.

PAZ-GONZÁLEZ, A.; VIEIRA, S.R.; CASTRO, M.T.T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, v.97, n.3/4, p.273-292, 2000.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Adv. in Agr.**, v.67, p.1-85, 1999.

POCAY, V.G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de latossolos sobcultivo intensivo de cana-de-açúcar**. Jaboticabal, 2000. 177p. Dissertação (Mestrado) – FCAV/UNESP.

PRADO, R. M.; 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.**, v.35, n.1, p.197-203, 2001.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.35, p.929-938, 2000.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf**. West Lafayette, 1990. 129p. Tese (Doutorado) - Michigan State University.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ. 1996. 513p.

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

RUBIN, R.B.; SILVA, V.R; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ZANETTE, A. Compressibilidade de dois solos sob plantio direto em função do estado inicial de compactação do solo. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 6, Brasília, 1998. **Resumos...** Brasília: Sociedade Brasileira de Plantio Direto na Palha, 1998. p.12-13.

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

SANTOS, P.I. B.; LANÇAS, K. P. Determinação da área de contato entre um pneu agrícola e uma superfície rígida utilizando-se o método da prensa hidráulica. **En. na Agr.**, v.14, n.3, p.57-64, 1998.

SCHAEFER, C.E.R.; SILVA, D.D.; PAIVA, K.W.N.; PRUSKI, F.F.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R.; ALBUQUERQUE, M.A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.37, n.5, p.669-678, 2002.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M. Accounter analysis methods for grouping means in the analysis of variants. **Biometrics**, v.30, p.507-512, 1974.

SILVA, A.P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum* L.)**. Piracicaba, 1984. 75p. Tese (Doutorado) - ESALQ/USP.



SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; VIEIRA, S.R. Variabilidade da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro ao longo de uma transeção. **R. Bras. Ci. Solo**, v.13, n.1, p.1-5, 1989.

SILVA, A.P. de; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.10, n.2, p.91-95, 1986.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: propriedades químicas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22, p.291-299, 1998.

SILVA, R.B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados**. Lavras, 2002. 142p. Tese (Doutorado) – UFLA.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M.; FOLLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos Cerrados. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 27, n. 6, p. 973-983, 2003.

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, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 4, p.239-249, 2000a.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v.30, p.795-801, 2000b.

SILVEIRA, G.M. **O preparo do solo: implementos corretos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Globo, 1989. 234p.

SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanics related process in structured agricultural soils**. Netherlands: NATO: Kluwer Academic Publishers, 1989. p.205-221.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 7.ed. Ames: Iowa State University, 1989. 507p.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. Compaction by agricultural vehicles: A review. II - Compaction under tyres and other running gear. **Soil Till. Res.**, v.1, p.373-400, 1981.

SOANE, B.D.; DICKSON, J.W.; CAMPBELL, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review. III - Incidence and control of compaction in crop production. **Soil Till. Res.**, v.2, p.3-36, 1982.

SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.

SOUZA, C.K. **Relação solo-paisagem-erosão e variabilidade espacial de latossolos em área sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal (SP)**. Jaboticabal, 2001. 186p. Dissertação (Mestrado) – FCAV/UNESP.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22, p.77-86, 1998.

SOUSA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar.

**Eng. Agríc.**, v.24, n.2, p.309-319, 2004.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria, MS. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, n.3, p.699-707, 2001.

SPAROVEK, G.; PEREIRA, J.C.; ALLEONI, L.R.F.; ROSSETO, R. Aptidão das terras de Piracicaba (SP) para o corte mecanizado de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.15, n.5, p.6-9, 1997.

STAFFORD, J. V. Essential Technology for Precision Agriculture. In: PRECISION AGRICULTURE, 3., Bloomington, 1996. **Proceedings...** Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1996. p.595-604.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.15, p.229-35, 1991.

STOLF, R. A compactação do solo e perspectivas da subsolagem em citros. **Laranja**, v.2, p.283-308, 1987.

STONE, J.A.; LARSON, W.E. Rebound of five onedimensionally compressed unsaturated granular soils. **Soil Sc. Soc. of Am. J.**, v.44, p.819- 822, 1980.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.25, n.2, p.395-401, 2001.

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

TANAKA, E.M. **Carreta de transbordo para cana-de-açúcar (Saccharium Spp): efeitos da condição de solo, tipo de rodado e da velocidade de deslocamento**. Botucatu, 2001. 114p. Dissertação (Mestrado) – FCA/UNESP.

TAVARES FILHO, J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.393- 399, 1999.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Til. Res.**, v.19, p.111-119, 1991.

TERSI, F.E.A.; ROSA, S.M. A subsolagem no manejo de solo para os pomares de citros. **Laranja**, v.16, p.289-298, 1995.

TIMM, L.C. **Efeito do manejo da palhada da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo**. Piracicaba, 2002. 115p. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22, p.301-309, 1998.

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.

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

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferrosol at several soil moisture conditions. **Soil & Til. Res.**, v.61, p.193-202, 2001.

VENDRUSCULO, L.G. **Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística**. Campinas, 2002. 87p. Dissertação (Mestrado) – FEA/UNICAMP.

VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M.P. del.; QUEIROZ, D.M. de; MANTOVANI, E.C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F.X.R. do; GOMIDE, R.L. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa: UFV, 2000. cap.5, p.93-108.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, v.56, n.1, p.181-90, 1997.

VIEIRA, S.R. Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM CONSERVAÇÃO DO SOLO, 1995. **Apostila**. Campinas: IAC, 1995. 61 p.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D. R. ; BIGGAR, J. W. ; TILLOTSON, P. M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 21, p. 525-533, 1997.

WARKENTIN, B.P. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; van den BERG, G.E., (Ed.). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: ASAE, 1971. p.126-153.

WARRICK, A.W.; MEYERS, D.E.; NIELSEN, D.R. Geostatistical methods applied to soil science. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASASS, 1986. cap.1, p.53-82.

WHITE, J.G.; ZASOSKI, R.J. Mapping soil micronutrients. **Field Crop Res.**, v.60, n.1, p.11-26, 1999.