

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

**ÍNDICE DE CONE, CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA E TEOR DE
ÁGUA DE QUATRO SOLOS DA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU/SP:
CORRELAÇÕES E MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO.**

JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

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

BOTUCATU - SP

Fevereiro – 2008

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

**ÍNDICE DE CONE, CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA E TEOR DE
ÁGUA DE QUATRO SOLOS DA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU/SP:
CORRELAÇÕES E MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO.**

JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

Orientador: Prof. Dr. **Kléber Pereira Lanças**

Co-orientador: Prof. Dr. **José Manuel Mirás Avalos**

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

BOTUCATU - SP

Fevereiro - 2008

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

Acosta, Juan José Bonnin, 1970-
A185i Índice de cone, capacidade de suporte de carga e teor de água de quatro solos da Fazenda Lageado, Botucatu/SP : correlações e mapas de isocompactação / Juan José Bonnin Acosta. - Botucatu : [s.n.], 2008.
xii, 145 f. : il. color., gráfs, tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008
Orientador: Kléber Pereira Lanças
Co-Orientador: José Manuel Miras Avalos
Inclui bibliografia.

1. Solos - Compactação. 2. Umidade. 3. Geoestatística. I. Lanças, Kléber Pereira. II. Mira Avalos, José Manuel. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

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

TÍTULO: "ÍNDICE DE CONE, CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA E TEOR DE
ÁGUA DE QUATRO SOLOS DA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU/SP :
CORRELAÇÕES E MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO"

ALUNO: JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

ORIENTADOR: PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS


Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. KLEBER PEREIRA LANÇAS



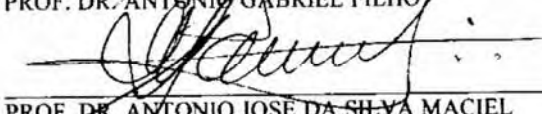
PROF. DR. SAULO PHILPE SEBASTIÃO GUERRA



PROF. DR. SILVIO JOSÉ BICUDO



PROF. DR. ANTONIO GABRIEL FILHO



PROF. DR. ANTONIO JOSÉ DA SILVA MACIEL

Data da Realização: 01 de fevereiro de 2008.

DEDICO

*Aos meus pais Griselda e Juan José.
Minha gratidão*

A minha esposa Gloria pelo carinho, apoio e incentivo; e aos meus filhos Karin e Santiago pela razão da minha vida.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Botucatu, pela oportunidade. Agradeço.

À Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Nacional de Assunção (FCA/UNA), Campus Universitario (San Lorenzo – Paraguai), pelo afastamento concedido durante este tempo.

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

Ao Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças, pela orientação, atenção e ensinamentos ao longo do curso, mas acima de tudo pelo apoio, confiança e amizade. Minha Gratidão.

Ao Prof. Dr. José Manuel Mirás Avalos, pela co-orientação, atenção e sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao amigo e colega Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra, pela atenção e amizade. Meu muito obrigado.

Aos grandes amigos, Paulo, Leonardo, Cristiano, Fernando, Paulinho e André pelo companheirismo e de maneira especial ao Prof. Dr. Antonio Gabriel Filho, pelo apoio e amizade. Obrigado.

Aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia Rural, pela acolhida sincera.

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|---------------|
| LISTA DE FIGURAS | VIII |
| LISTA DE TABELAS | XI |
| 1 RESUMO | 1 |
| 2 SUMMARY | 3 |
| 3 INTRODUÇÃO | 5 |
| 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 4.1 Compactação em solos agrícolas | 8 |
| 4.2 Causas e efeitos da compactação do solo agrícola | 11 |
| 4.3 Avaliação da compactação do solo | 16 |
| 4.4 Compressibilidade do solo | 21 |
| 4.5 Geoestatística: conceitos e fundamentos gerais..... | 24 |
| 5 MATERIAL E MÉTODOS | 35 |
| 5.1 Caracterização das áreas experimentais..... | 35 |
| 5.2 Determinação da resistência do solo à penetração..... | 38 |
| 5.2.1 Análise geoestatística | 42 |
| 5.3 Obtenção do modelo de capacidade de suporte de carga do solo..... | 44 |
| 5.3.1 Esquema de amostragem e coleta de dados | 44 |
| 5.3.2 Densidade de partícula (Dp) | 45 |
| 5.3.3 Densidade de solo (Ds) | 47 |
| 5.3.4 Porosidade no solo (P) | 47 |
| 5.3.5 Teor de água no solo | 48 |
| 5.3.6 Limites de consistência do solo | 48 |
| 5.3.7 Obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p) | 49 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 6.1 Área 1..... | 52 |
| 6.2 Área 2..... | 73 |

| | Página |
|---|---------------|
| 6.3 Área 3..... | 91 |
| 6.4 Área 4..... | 110 |
| 7 CONCLUSÕES..... | 129 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 131 |

LISTA DE FIGURAS

| Figuras | | Página |
|----------------|---|---------------|
| 1 | Semivariograma experimental, modelo teórico e o semivariograma típico e seus componentes..... | 29 |
| 2 | Vista geral da Área 1..... | 36 |
| 3 | Vista geral da Área 2..... | 37 |
| 4 | Vista geral da Área 3..... | 37 |
| 5 | Vista geral da Área 4..... | 38 |
| 6 | Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) utilizada para levantamento da resistência do solo à penetração, amostragem do solo e georeferenciamento dos pontos..... | 39 |
| 7 | Espacialização dos pontos amostrados das áreas para elaboração dos mapas de capacidade de suporte de carga do solo..... | 41 |
| 8 | Detalhe do processo de amostragem do solo, com o amostrador hidráulico para os ensaios de compressibilidade..... | 46 |
| 9 | Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. Limites de líquidos (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC)..... | 49 |
| 10 | Procedimentos laboratoriais para realização dos ensaios de compressibilidade e obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p)..... | 50 |
| 11 | Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1..... | 60 |
| 12 | Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1..... | 61 |
| 13 | Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1..... | 62 |
| 14 | Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1..... | 63 |
| 15 | Modelos de compressibilidade da Área 1, na profundidade de 0 a 200mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 65 |

| Figuras | Página |
|--|---------------|
| 16 Modelos de compressibilidade da Área 1, na profundidade de 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 67 |
| 17 Modelos de compressibilidade da Área 1, na profundidade de 0 a 200mm, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo..... | 72 |
| 18 Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2..... | 80 |
| 19 Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2. | 81 |
| 20 Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2..... | 82 |
| 21 Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2. | 83 |
| 22 Modelos de compressibilidade da Área 2, na profundidade de 0 a 200mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 86 |
| 23 Modelos de compressibilidade da Área 2, na profundidade de 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 87 |
| 24 Modelos de compressibilidade da Área 2, na profundidade de 0 a 200mm, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo..... | 91 |
| 25 Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3..... | 100 |
| 26 Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3..... | 101 |
| 27 Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3..... | 102 |
| 28 Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3..... | 103 |

| Figuras | | Página |
|----------------|--|---------------|
| 29 | Modelos de compressibilidade da Área 3, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 106 |
| 30 | Modelos de compressibilidade da Área 3, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo..... | 110 |
| 31 | Mapas de atributos de índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4..... | 118 |
| 32 | Mapas de atributos de índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4..... | 119 |
| 33 | Mapas de atributos de índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4..... | 120 |
| 34 | Mapas de atributos de índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4..... | 121 |
| 35 | Modelos de compressibilidade da Área 4, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 124 |
| 36 | Modelos de compressibilidade da Área 4, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo..... | 128 |

LISTA DE TABELAS

| Tabelas | | Página |
|----------------|---|---------------|
| 1 | Teor de água considerado nos ensaios de compressibilidade para cada área.... | 50 |
| 2 | Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 1.. | 53 |
| 3 | Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da Área 1..... | 55 |
| 4 | Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 1..... | 57 |
| 5 | Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica. | 64 |
| 6 | Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 65 |
| 7 | Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 69 |
| 8 | Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 2. | 74 |
| 9 | Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da área 2. | 75 |
| 10 | Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 2. | 77 |
| 11 | Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica. | 84 |
| 12 | Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 85 |
| 13 | Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 89 |
| 14 | Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 3. | 93 |
| 15 | Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da área 3. | 95 |

| Tabelas | | Página |
|----------------|---|---------------|
| 16 | Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 3. | 97 |
| 17 | Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica. | 104 |
| 18 | Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 105 |
| 19 | Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 108 |
| 20 | Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 4. | 112 |
| 21 | Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da área 4. | 113 |
| 22 | Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 4. | 115 |
| 23 | Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica. | 122 |
| 24 | Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 123 |
| 25 | Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989). | 126 |

1 RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar a ocorrência e distribuição da compactação, bem como a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração medida através do índice de cone (IC), correlacionando-a com o modelo de capacidade de suporte de carga do solo, visando estabelecer um procedimento que permita localizar e visualizar pontos ou zonas compactadas. Os experimentos foram realizados na Fazenda Lageado da UNESP/FCA, Botucatu/SP., sendo selecionados quatro diferentes tipos de solos, sendo: solo 1: LATOSSOLO VERMELHO (LV), textura média, teores de argila entre 15 a 34 %, e elevado grau de intemperização; solo 2: NEOSSOLO FLÚVICO (RU), oriundo de materiais não consolidados, de deposição recente, desenvolvidos sob releve plano, revelando camadas nitidamente estratificadas, ou seja, extratos granulometricamente muito distintos, podendo aparecer camadas argilosas sobrepostas a camadas arenosas ou vice-versa; solo 3: NITOSSOLO VERMELHO distroférico, de textura argilosa, com teores de argila superiores a 50 %, manejada em sistema de plantio direto e solo 4: NITOSSOLO VERMELHO distroférico, de textura argilosa, com teores de argila superiores a 50 %, preservada em pousio por vários anos. Utilizou-se um penetrômetro hidráulico-eletrônico para a amostragem da resistência mecânica do solo à penetração, em 5 épocas diferentes, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40 m. O teor de água do solo foi monitorado durante a avaliação do IC, nas profundidades de 0 a 0,20 e de 0,20 a 0,40 m. A análise espacial foi realizada através da geoestatística, para a construção do semivariograma e

através da técnica de interpolação, construíram-se os mapas de isocompactação do solo. A evidência da relação entre o teor de água do solo e o IC de mapas interpolados nem sempre foi possível, principalmente em situações em que o solo apresentou-se com elevado teor de água ou extremadamente seco. Os valores médios do IC e teor de água da área 1 (LATOSSOLO VERMELHO), ficaram entre 1,42 e 8,99 MPa e 9,59 a 17,63 % respectivamente. Na área 2 o IC e teor de água entre 0,30 e 5,65 MPa, e o teor de água entre 13,64 a 27,92 %. Na área 3 (NITOSSOLO VERMELHO), o IC entre 1,58 a 8,17 MPa e 17,46 e 31 %, respectivamente. Na área 4 (NITOSSOLO VERMELHO), o IC e teor de água estiveram entre 1,16 e 6,24 MPa, e 16,76 a 23,49 %, respectivamente. Os resultados demonstram a notável heterogeneidade espacial destes elementos, sendo os modelos de capacidade de suporte de carga do solo estimaram satisfatoriamente a pressão de preconsolidação (σ_p) em função do teor de água do solo, permitindo que fosse identificada em cada solo analisado, a camada de maior resistência mecânica e conseqüentemente a mais afetada pelo tráfego de máquinas e as ferramentas de preparo do solo. As correlações positivas entre as equações de σ_p , obtidas pelos métodos laboratoriais e estimadas em função do IC, mostraram-se um excelente procedimento para localizar e visualizar pontos ou zonas compactadas ou de elevada resistência mecânica, constituindo-se num importante recurso para avaliar o impacto do tráfego agrícola sobre a mobilização dos solos sobre suas estruturas.

Palavras-chave: compactação, resistência do solo, geoestatística

CONE INDEX, LOAD CAPACITY AND MOISTURE CONTENT OF FOUR SOILS OF LAGEADO FARM, BOTUCATU/SP-BRAZIL: CORRELATIONS AND ISOCOMPACTION MAPS. Botucatu, 2008. 150p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JUAN JOSÉ BONNIN ACOSTA

Adviser: KLÉBER PEREIRA LANÇAS

Co-adviser: JOSÉ MANUEL MIRÁS AVALOS

2 SUMMARY

The aim of this work was to evaluate the soil compaction and its distributions, soil water content influence on the soil resistance measured by the soil cone index (CI), correlating the soil load capacity model in order to establish a procedure able to locate points or zones with soil compaction. The experimental area was at Lageado Experimental Farm, UNESP/FCA, Botucatu/Sao Paulo. Different soil types were used and a hydraulic-electronic penetrometer was used to measure the soil resistance at 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 and 0.30-0.40 m. During the soil cone index sampling, soil core samples were taken at 0-0.20m and 0.20-0.40m depths in 5 different dates. Geostatistics was used to analyze the spatial variability and semivariograms were done. Using interpolation techniques isocompaction maps were made. The relation between soil water content and soil cone index sometimes was not possible, mainly in places where the soil was extremely wet or extremely dry. Mean soil cone index values and water content values for area 1 were between 1.42 to 8.99 MPa and 9.59 to 17.63%, respectively. On area 2 the soil cone index was between 0.3 to 5.65 MPa and water content value was between 13.64% to 27.92%. On area 3 the CI was between 1.58 to 8.17 MPa and water content value was between 17.46% to 31%, and for area 4 the IC and water content value was 1.16 to 6.24 MPa and 16.76 to 23.49%, respectively. Those results showed a spatial heterogeneity for those parameters. Models of soil load capacity estimate quite well the preconsolidation pressure (σ_p) in function of soil water

content, allowing identifying, in each area, the layer with higher mechanical resistance probably more affected by the traffic and soil tillage. The σ_p could be determined in function of CI and reviewed to be an excellent tool to identify point or zone with soil compaction or with higher mechanical resistance. Those are a important technology to evaluate the traffic impact on the agricultural soil structure.

Keywords: compaction, soil resistance, geostatistics

3 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna tem como fundamento, o desenvolvimento sustentável, que objetiva uma produtividade econômica sem degradar o ambiente. Uma exploração agrícola sustentável requer, entre outros fatores, de manutenção e melhoria da qualidade do solo; porém, a intensificação da exploração agrícola, aliada ao uso e manejo inadequado do solo, tem provocado modificações negativas nas propriedades físicas do solo, em especial àquelas que afetam a relação solo-água, uma vez que o solo constitui-se no principal reservatório para as plantas.

A mecanização agrícola é um componente básico na maioria das estratégias de desenvolvimento rural quanto ao aumento da produtividade. A intensificação do uso de máquinas agrícolas, nas diversas etapas do processo de produção é a principal responsável pelas mudanças prejudiciais às propriedades físicas dos solos. Nesse contexto, a compactação do solo tem sido um dos grandes problemas da agricultura moderna. Seu efeito tem causado expressivas perdas econômicas nas principais atividades agrícolas, além de contribuir para a degradação do meio ambiente.

Em alguns trabalhos constatou-se que grande parte da compactação ocorre logo após as primeiras passadas das máquinas na área e, os tráfegos posteriores, adicionam compactação ao solo somente com aumento na carga aplicada em relação à carga anterior ou em teores de água do solo mais elevados. O conhecimento dos mecanismos e

processos envolvidos nestas alterações possibilitam aos técnicos tomarem decisões de manejo com o objetivo de controlar as limitações devido à possibilidade de compactação do solo.

Portanto é de fundamental importância a avaliação da compactação dos solos como também a escolha do melhor sistema de manejo, que visa restituir as condições físicas a um nível satisfatório. Pesquisadores afirmam que o grau de compactação do solo desejado para tração difere daqueles para infiltração e crescimento radicular, assim a compactação deve ser mantida em níveis compatíveis com a cultura instalada e as pesquisas devem focar a ação da compactação ao longo do perfil do solo e em profundidade.

Inúmeros autores sugerem que a compactação do solo seja identificada, através de atributos do solo, como a densidade do solo, distribuição dos poros por tamanho, estabilidade de agregados em água e através da resistência do solo à penetração, com a finalidade de verificar a existência de camadas de maior resistência e o potencial para o desenvolvimento das raízes. Dentre estas, a resistência do solo à penetração é a mais utilizada devido à facilidade e rapidez na obtenção de dados, além do baixo custo com que numerosas medidas podem ser realizadas.

A magnitude da resistência do solo à penetração tem sido mensurada por meio de equipamentos denominados penetrômetros. Esses equipamentos quantificam a pressão de penetração, resultando em valores denominados de índice de cone (IC), que por sua vez se relacionam com a densidade dos solos e inversamente com o teor de água. A influência do teor de água na obtenção do índice de cone com os penetrômetros tem motivado estudos para a verificação da importância dessa influência ou tentativa de isolar esse fator. No geral, recomenda-se que se faça a medida em condição de capacidade de campo. Entretanto, essa recomendação não resolve o problema. O ideal seria medir o teor de água no momento da sondagem do penetrômetro e posteriormente se efetuar algum tipo de correção para um valor constante de teor de água.

Contudo, verifica-se que quase todos restringem-se em avaliar o fenômeno da compactação, desconsiderando qualquer possibilidade preditiva. Os modelos de compressibilidade do solo, obtidos a partir da pressão de preconsolidação em função de diferentes teores de água, têm se mostrado uma alternativa viável na modelagem e predição da capacidade de suporte de carga dos solos agrícolas. São poucos os trabalhos que buscam modelar o comportamento da estrutura do solo, visando à determinação de sua capacidade de

suporte de carga para uma condição específica de manejo, que poderá ser usada para evitar a compactação adicional do solo de forma que, em manejos futuros, os efeitos indesejáveis do tráfego e da mecanização possam ser evitados.

Com base nessas considerações o objetivo desta pesquisa foi avaliar a ocorrência e distribuição da compactação, bem como a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração medida através do índice de cone (IC), correlacionando-a com o modelo de capacidade de suporte de carga do solo, visando estabelecer um procedimento que permita localizar e visualizar pontos ou zonas compactadas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Compactação em solos agrícolas

O solo é um material poroso, cujo volume total é composto pelo volume de sólidos, constituído de compostos orgânicos e minerais, e pelo volume de poros, que é preenchido parcialmente com ar e com água. Quando o espaço poroso está totalmente preenchido por água, diz-se que o solo está saturado (ASSIS, 1988).

Os solos agrícolas estão sujeitos à compactação, devido a fenômenos naturais ou ao tráfego intensivo de máquinas e equipamentos agrícolas utilizados no processo produtivo. Esta compactação restringe a disponibilidade de água e de nutrientes para as culturas e oferece, ainda, resistência mecânica ao desenvolvimento radicular das plantas (CAPPELLI et al., 1995). Este fenômeno é conhecido pelos agricultores, principalmente aqueles que utilizam práticas agrícolas com alto grau de mecanização, causando assim um decréscimo na produção da cultura (SILVA et al., 1986).

Raney et al. (1955) estudaram a compactação do solo e a dividiram em dois tipos: o primeiro de origem genético, resultante da ação lenta e continua dos processos pedogenéticos, formando-se ao final, horizontes de impedimento à penetração de raízes e água. O segundo tipo, a compactação induzida pela aplicação de forças externas à superfície do solo.

Por sua vez, Vandenberg (1966) conceituou a compactação do solo como sendo uma deformação física do solo causado pelo seu manejo. Gameda et al. (1985) consideraram a compactação como a consequência da ação de forças externas, que provocam um aumento da densidade num perfil vertical do solo. Entanto, Lanças (1996a) definiu a compactação como o resultado do rearranjo das partículas do solo submetidas a forças, originando um aumento na sua densidade pela diminuição do seu volume para uma massa de partículas constante.

Para Harris (1971), uma alteração nas condições de compactação do solo é o resultado de uma mudança no volume desse solo, causado pelas forças mecânicas. O mesmo autor considerou que o solo deve ser descrito em termos de uma estrutura de partículas sólidas de dimensões variáveis, circundadas por espaços, os quais devem conter substâncias líquidas ou gasosas.

De acordo com Chancellor (1977), o volume total de um solo é formado pelo volume de partículas minerais e por poros entre as partículas. O solo é considerado compactado quando a proporção de macroporos em relação à porosidade total é inadequada para o eficiente desenvolvimento da planta.

Segundo Rípoli (1985) e Seixas (1996), a ocorrência de compactação do solo dá-se quando há redução da macroporosidade (poros $> 50\mu\text{m}$) e aumento da densidade do solo, sendo pouco afetados os micrósporos. Definindo assim, a compactação como o aumento da concentração de massa por deslocamento indiscriminado das partículas a partir de processo mecânico não originário do próprio solo. A compactação envolve um rearranjo e aproximação das partículas sólidas do solo, e conseqüentemente, um aumento na densidade deste.

A redução da macroporosidade tem, segundo Vomocil e Flocker (1961), como limite inferior, 10% quando o solo estiver na capacidade de campo. Outros autores também consideraram como limite mínimo 10% de macroporosidade sem o qual a difusão dos gases e os mecanismos de mobilização de nutrientes, difusão e fluxo de massa são prejudicados (FERNANDES e GALLOWAY, 1987; NOVAK et al., 1992 e SEIXAS, 1996).

Stolf (1987) expõe que a macroporosidade dos solos arenosos e argilosos deve-se a fatores diferentes. Nos solos arenosos a macroporosidade ocorre devido ao tamanho de suas partículas, cujos grânulos são 100 vezes maiores do que as argilas, já em

solos argilosos, os macroporos são consequência da sua estrutura, pois as condições físico-químicas e biológicas do solo permitem que as partículas de argila se agrupem, formando unidades maiores, com consequente formação de poros maiores. O autor cita ainda que sob pressão a estrutura sofre deformações, tornando este tipo de solo mais susceptível a compactação.

Weaver (1950) propôs que, a umidade ótima para execução das operações de preparo do solo coincide aproximadamente com o teor que proporciona máxima compactação do solo. Sendo assim, devem-se procurar outros meios de facilitar essa operação, buscando trabalhar o solo às umidades mais baixas ou à utilização de máquinas que exerçam mínimo de pressão possível sobre o solo.

Segundo Raney et al. (1955), os solos mais susceptíveis à compactação são os de textura média à moderadamente grosseira (franco, franco arenoso e franco siltoso) pela maior facilidade de reorganização de suas partículas. Obviamente os solos altamente porosos são mais susceptíveis ao processo de compactação que os solos menos porosos. Para estes autores, em condições parcialmente saturadas, quanto maior o teor de água do solo maior será a compactação para uma dada pressão aplicada. Depois de atingido ponto de saturação as mudanças de volume da massa de solo ocorrem somente por perda da amostra.

Conforme Marshall e Raney (1960), zonas compactadas do solo são definidas como sendo o resultado da deterioração da sua estrutura, tendo como principal consequência a diminuição da porosidade do solo nas camadas logo abaixo da profundidade de trabalho dos órgãos ativos das máquinas. Estes autores classificaram os solos com pouca matéria orgânica ou estrutura fraca, como mais susceptível à compactação pelo tráfego e ação das máquinas e implementos.

Segundo Corsini (1993), as ações mecânicas nos Latossolos alteram, por curto espaço de tempo, a relação massa/volume no solo e degradam a sua estrutura natural. Quanto mais pobre a estrutura do solo, maior a necessidade de operações mecânicas e quando mais mobilizado pior a sua estrutura.

A compactação do solo é um dos principais fatores de limitação ao crescimento radicular de plantas cultivadas em solos que variam de franco-arenosos a franco argiloso e com argila de baixa atividade. Nesta ampla faixa, encontra-se a maioria dos solos tropicais altamente intemperizados, enquadrando-se grande parte dos solos brasileiros. Nos

solos de textura argilosa, o cultivo mecanizado convencional poderia ser adotado sem problemas, desde que a movimentação de água ao longo do perfil fosse livre. Já nas áreas onde aparece a compactação, algum sistema de cultivo reduzido deve ser preconizado, de maneira a reduzir o tráfego de máquinas e possibilitar uma adequada conservação do solo (CAMARGO e ALLEONI, 1997).

Segundo Balastreire (1987), as propriedades físicas do solo mais seriamente afetadas estão associadas com o teor e transmissão de água, ar, calor, nutrientes, gases e aumento da resistência do solo. Já do ponto de vista fisiológico, afeta o crescimento de plantas devido à redução de volume de macroporos, diminuindo a taxa de infiltração e retenção de água no solo, favorecendo o escoamento superficial e erosão. Pode ocorrer pela redução das trocas gasosas uma diminuição da concentração de O_2 , permitindo que Fe e Mn passem às formas reduzidas as quais são tóxicas, reduzindo a atividade metabólica e impedindo a entrada de água, uma vez que, para a água entrar o ar tem que sair (VANDENBERG e GILL, 1968).

Inúmeros autores sugerem que a compactação do solo seja identificada, através de atributos do solo, densidade do solo, distribuição de poros por tamanho, estabilidade de agregados e resistência do solo à penetração, com a finalidade de verificar a existência de camadas de maior resistência. Estes atributos tradicionalmente usados apenas identificam as camadas compactadas sem, entretanto, quantificar a capacidade de suporte de carga dos solos (SILVA, 2002).

4.2 Causas e efeitos da compactação do solo agrícola

De acordo com Ohu et al. (1988), a compactação do solo agrícola é influenciada por diversos fatores, sendo muitos deles de difícil mensuração, visto que as propriedades físicas do solo variam também em função do tempo, sob a influência do clima, manejo do solo e crescimento da planta.

A severidade da compactação depende da magnitude e natureza da força compactante, teor de água no solo, textura, densidade inicial do solo, e a quantidade de matéria orgânica incorporada e em cobertura (STONE e EKWUE, 1993).

A água no solo atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento entre elas. Desta forma, o movimento das partículas de solo é favorecido pelo aumento do teor de água. Este processo continua até que a água sature praticamente todos os poros do solo. A partir desse momento, a cada incremento no conteúdo de água não corresponderá um incremento na densidade, visto que a água não pode ser comprimida (SILVA et al., 2000). Essas diferenças parecem estar relacionadas com o fato de que a diminuição do conteúdo de água no solo incrementa o número de contatos entre as partículas, o que por sua vez, depende diretamente da textura do solo (McNABB e BOERSMA, 1996).

Os mecanismos de retenção de água no solo dependem da sua composição granulométrica, principalmente em tensão elevadas. Vários trabalhos têm procurado relacionar retenção de água com composição granulométrica (FAULIN, 2005). O tamanho do agregado e o seu teor de água têm uma significativa influência na compactação do solo. Segundo Willat (1987), os agregados grandes têm maior tendência para a compactação em altos teores de água. Com menores teores de água essa tendência se inverte, pois os agregados pequenos apresentam, nessas condições maior capacidade de compactação.

Russo e Bresler (1981) salientaram que as propriedades hidráulicas do solo geralmente não variam aleatoriamente no espaço, mais apresentam arranjo estrutural com uma dimensão característica, correspondente ao domínio desta propriedade, ou seja, a dimensão dentro da qual há interdependência dos valores medidos. Isto decorre das características do material originário e da ação dos fatores de formação.

Segundo Imhoff (2002), apesar de muitos estudos terem sido feitos, não se tem uma quantificação, universalmente aceita, da influência de uma determinada variação no teor de água sobre a resistência à penetração para diferentes solos, ou seja, se esta resistência varia linearmente, ou não, em função de iguais acréscimos no teor de água. Ainda, se estes acréscimos influenciam o coeficiente de variação dos dados de resistência à penetração, obtidos na caracterização de um determinado solo. Para Larson e Gupta (1980) e O'Sullivan (1992), não há relação entre estes dois atributos, mas Sánchez-Girón et al. (1998) demonstrou que a suscetibilidade do solo à compactação foi fortemente correlacionada com o teor de água no solo.

Para Dias Junior (1994), o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é o teor de água. Assim, quando os solos estão mais

secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa. Entretanto, sob condições de alto teor de água, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas (VOORHEES et al., 1987). Para Mantovani (1987), quanto maior o teor de água mais suscetível à compactação ficará o solo, sendo que a umidade mais crítica a favorecer a compactação corresponde àquela faixa próxima da capacidade de campo.

Diversos estudos comprovaram a eficácia do intervalo hídrico ótimo como indicador de alterações nas propriedades físicas do solo em diferentes culturas e sistemas de manejo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; WU et al., 2003). Silva et al. (2003), estudando o intervalo hídrico ótimo na cultura do feijão, verificaram que no preparo reduzido do solo a cultura permaneceu três dias a mais no intervalo hídrico ótimo quando comparado ao preparo convencional e ao plantio direto; contudo, esta diferença não se refletiu na produtividade da cultura. Portanto, o aumento da umidade ótima de compactação com o aumento do teor de argila está relacionado com sua capacidade de adsorção de água (SILVA et al., 1986; STONE e EKWUE, 1993).

Em áreas que possuem um período sazonal pequeno para o crescimento das plantas ou em sistemas de manejo com três culturas por ano, as operações de preparo do solo são realizadas assim que os solos são considerados trafegáveis. Entretanto, nessas condições, eles muitas vezes ainda estão úmidos demais e esse tráfego pode resultar em compactação adicional do solo (HAKANSSON et al., 1988). Assim, o ideal é que o intervalo hídrico ótimo de cada classe de solo seja respeitado para evitar problemas com a compactação.

Segundo Pedrotti et al. (1998), com a compactação excessiva do solo tem-se uma menor produtividade agrícola, uma vez que esta proporciona condições desfavoráveis ao crescimento das plantas. De acordo com Negi et al. (1990), o desempenho de uma cultura é influenciado pelas condições físicas e químicas do solo. A camada compactada dificulta a penetração das raízes, a permeabilidade de ar e de água (LANÇAS et al., 1990). Assim o sistema radicular se concentra na camada superficial do solo, diminuindo a área de contato solo-raiz, o que resulta em menor disponibilidade de nutrientes. Wolf e Hadas (1984) afirmaram que o aumento da densidade do solo pode causar uma redução na produção através do surgimento de plantas de pequeno porte, população irregular e diminuição do poder de retenção de água do solo.

Segundo Salvador e Granato (1999), o efeito da compactação na produção das culturas é difícil de ser observado. Da mesma forma, que é muito difícil estabelecer valores limites para a densidade, a porosidade, a penetrabilidade e a infiltração, pois dependem das condições presentes em cada local ou gleba.

Outra forma de compactação do solo pode ocorrer pela reação do solo às pressões e cargas impostas pelas máquinas agrícolas. De acordo com Silva et al. (2000), a compactação do solo é resultante do somatório de vários fatores relativos às máquinas agrícolas (tipo, largura e pressão de inflação dos pneus, massa e carga por eixo) e o solo, os quais influenciam nas propriedades físicas e biológicas do solo e suas relações com o crescimento e produtividade das plantas.

Para Correchel et al. (1999), os fatores que causam a variabilidade espacial da densidade do solo são: o tráfego de máquinas nas operações de manejo, os processos de secamento e umedecimento do solo e o efeito no sistema radicular das plantas. O tráfego de veículos sobre os solos agrícolas tem sido responsável por sérias modificações, influenciando no comportamento solo-ar-água, com efeitos perniciosos no crescimento das plantas.

Segundo Balastreire (1987), desde os mais remotos tempos, as operações de preparo de solo, têm sido realizadas com a finalidade de proporcionar as melhores condições para o desenvolvimento das sementes colocadas no solo. Mais a movimentação constante de máquinas e caminhões sobre as áreas cultivadas são os fatores mais importantes na compactação do solo. A pressão exercida sobre a superfície do terreno pelo peso da máquina, dá origem a uma força externa que causa uma reorganização das partículas do solo, que passam a ocupar menor volume, caracterizando o fenômeno da compactação. O grau ou intensidade da compactação depende de uma série de fatores, principalmente o tipo de solo, teor de água, peso do veículo e número de vezes que este se desloca sobre o terreno (DURUOHA, 2000).

De acordo com Mantovani (1987), a exploração de duas culturas por ano, aliadas a cronogramas de trabalho de preparo do solo muito apertados e com intensa movimentação de máquinas e implementos cada vez mais pesados, tem sido um fator importante para o aumento da compactação do solo e diminuição da produtividade agrícola em diversas regiões do Brasil.

Segundo Voorhees et al. (1989), o tráfego de máquinas e implementos agrícolas, pode ocasionar aumento da densidade global do solo em até 20 %, sobretudo nas operações de colheita onde ocorrem excessos de cargas, com isto as propriedades físicas do solo são afetadas a profundidades que podem atingir até 60 cm.

Para Raghavan et al. (1977), das muitas variáveis envolvendo a interação máquina-solo, o deslocamento dos rodados parece ser um dos mais importantes, provocando sensíveis aumentos na densidade global do solo, durante as operações com máquinas agrícolas. É importante considerar que o peso do veículo atinge o solo através das rodas, portanto, conforme a área de contato do sistema de rodagem, esta pressão poderia ser concentrada em uma pequena faixa ou ser diluída numa faixa mais larga.

No Brasil, algumas das principais pesquisas foram realizadas por Coleti e Demattê (1982); Fernandes e Galloway (1987); Milan (1986); Mialhe (1980) e Lanças (1996a), enfocando de modo geral a capacidade de tração, mobilidade, tráfego e seus efeitos nas propriedades físicas do solo. Igualmente, outros autores estudaram alguns outros fatores associados à compactação, como Novak et al. (1992), que estudaram o efeito da pressão de contato na compactação.

Segundo Magalhães (1990), a cana-de-açúcar é a cultura cujo solo está sujeito aos mais severos índices de compactação do solo, cujos meios de transportes transitam com 25 toneladas de carga, em média, nas áreas de cultivo, provocando compactação na profundidade, onde concentram-se 70 a 80 % das raízes da cana planta ou das soqueiras.

Ainda hoje, na cana-de-açúcar a maioria das unidades produtoras adota o sistema de colheita semi-mecanizado com queima prévia, mas este cenário está sendo alterado. Os produtores estão ajustando-se ao sistema mecanizado com colhedoras autopropelidas (TANAKA, 2001). Com o que acarretaria um aumento nos índices de compactação do solo, já que uma colhedora de cana-de-açúcar pesa cerca de 13 toneladas de acordo com Balbo (1994).

Para Silva et al. (1999), a compactação dos solos agrícolas constitui um dos maiores problemas e desafios a práticas conservacionistas de manejo de solos. O sistema de plantio direto é uma técnica eficiente no controle da erosão do solo, quando comparado ao sistema convencional (BERTOL et al.; SEGANFREDO et al., 1997), porém alguns estudos indicam uma maior compactação no sistema de plantio direto, provocada pelo

efeito cumulativo do tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas sólidas (KLEIN e BOLLER, 1995).

Vários trabalhos indicaram aumento no estado de compactação dos solos submetidos ao sistema plantio direto (HAKANSSON et al., 1988; SILVA et al., 1997). Segundo Tormena et al. (1998), no plantio direto a movimentação do solo é restrita à linha de semeadura, mas a ocorrência sistemática do tráfego causa compactação na camada superficial do solo.

De acordo com Dias Junior e Pierce (1996), devido à intensificação do uso de sistemas de preparos conservacionistas do solo e do uso de equipamentos e maquinários agrícolas tem havido, atualmente, bastante interesse e preocupação por parte de pesquisadores e agricultores pelo tema da compactação do solo.

Alguns autores afirmaram que a compactação pode ser benéfica em determinadas circunstâncias, como afirmou Voorhees (1977), ao considerar que certo grau de compactação pode evitar a erosão na entressafra. Alvarenga et al. (1987) consideraram que dentro de certo nível a redução de diâmetro dos poros pela compactação, poderá ser fator favorável ao desenvolvimento vegetal por aumentar a retenção de água.

Igualmente, Balastreire (1987) considerou que se não houver limitações de água e as práticas de manejo fornecerem fertilidade adequada, uma compactação moderada não deve ser o fator limitante em um sistema produtivo.

Taylor et al. (1979) afirmaram que compactação por si só não é boa ou má, mas que depende de cada situação. O que pode-se verificar é que não há um índice de compactação bem estabelecido para as diferentes culturas. Schafer et al. (1992) afirmaram que as pesquisas deveriam permitir uma futura relação entre compactação e sua associação com os fatores produtivos, de modo a propiciar uma maneira de se manter um grau de compactação em níveis satisfatórios conciliando produção e conservação dos recursos naturais.

4.3 Avaliação da compactação do solo

O estado de compactação do solo tem sido avaliado por meio de diversos parâmetros físicos, tais como: densidade do solo (CAMPBELL, 1994), porosidade total (VEENHOF e MCBRIDE, 1996) e resistência do solo à penetração (SILVA et al., 1994).

Segundo Mantovani (1987), o melhor método para determinar a compactação do solo é através da sua densidade, mas é a porosidade que se constitui no parâmetro de maior significado para se usar na discussão da compactação do solo, por causa da descrição direta da proporção de volume do solo disponível para raízes das plantas, da água e do ar que elas requerem. Também Stolf (1987) expôs que a densidade do solo não permite a comparação entre solos diferentes, principalmente no tocante à granulometria, sugerindo a análise dos macroporos para a elaboração de critérios de descompactação do solo. Entretanto estes ensaios não podem ser realizados a campo e com rapidez e quando isto se faz necessário.

Para Bowen e Kratky (1985), as propriedades mais usadas para avaliar a compactação são a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração, demonstrando, esta última, boa correlação com o crescimento radicular, dado que a elongação das raízes varia de forma inversamente proporcional a tal resistência. Por outro lado, têm-se trabalhos de pesquisa que mostraram a relação direta entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo, (BELTRAME et al., 1981; BORGES et al., 1999; CASTRO, 1995).

A resistência do solo à penetração tem sido freqüentemente utilizada como indicador da compactação do solo em sistemas de manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação, (MERCANTE et al., 2003; STOLF et al., 1983; TORMENA e ROLOFF, 1996).

Os métodos para avaliação da camada compactada do solo podem ser divididos conforme Lanças (1996a), em três principais grupos: a) métodos visuais, subjetivos ou grosseiros: sulcos de erosão, fendas nos rastros dos rodados, crostas superficiais, raízes mal formadas, sistema radicular raso e espalhado, plantas com tamanhos menores que o padrão, emergência lenta da plântula, coloração deficiente, b) métodos precisos: este método envolve análise de laboratório: densidade do solo, percentagem de macroporos, condutividade hidráulica, e, c) métodos intermediários: avaliação da resistência à penetração do solo utilizando penetrômetros ou penetrógrafos.

Os penetrômetros ou penetrógrafos são instrumentos que medem a resistência à penetração em unidades de pressão (força por unidade de área) de um cone padronizados pela AMERICAM SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE R313.2 (1997), posicionado na extremidade de uma haste de metal, quando inseridos no interior do solo. Essa resistência à penetração está relacionada à resistência exercida pelo solo

à penetração e crescimento das raízes e, portanto, pode ser utilizada como uma medida da compactação dos solos.

Segundo Rohm (1984), a penetração de uma haste no terreno é uma técnica utilizada há muito tempo para se obter medidas de resistência das camadas que compõem um terreno. Engenheiros e arquitetos valiam-se da introdução de varas de madeiras ou hastes metálicas no solo já no início do século XIX com o objetivo de comparar locais construídos com outros a serem explorados, baseados na resistência oferecida pelo terreno à introdução de uma haste. A evolução deste processo rudimentar deu origem aos penetrômetros hoje usados principalmente na obtenção de informações da subsuperfície em locais onde a amostragem ou outros tipos de determinações tornam-se difíceis ou até mesmo impossíveis, ou seja, economicamente inviáveis.

Esses instrumentos podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o tipo de penetração no interior do solo: a) estáticos, quando a penetração é realizada com velocidade constante, com um sistema hidráulico ou elétrico-eletrônico ou mesmo manual e b) dinâmicos ou penetrômetros de impacto onde a penetração é proporcionada por impactos de um corpo metálico. Os penetrômetros estáticos são os mais utilizados em ciência do solo e agronomia e são equipamentos caros e sofisticados quando em versões automáticas e no caso das versões manuais tem-se a dificuldade da inserção com velocidade constante. O segundo grupo, o dos dinâmicos de um modo geral, tem sido bem menos utilizado, em estudos agronômicos, sendo mais aplicados em avaliações de solos para fins de construção de estradas e geotecnia (VAZ. et al., 2001).

Para a mensuração das camadas adensadas de solo através do perfil do solo, existem vários tipos e modelos de penetrômetros que foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas, como os descritos por Hendrick (1969); Prather et al. (1970); Smith e Dumas (1978); Wilford et al. (1972). Entretanto, no Brasil, na década de 80, o Planalsucar/IAA, desenvolveram um penetrômetro de impacto (STOLF, 1991), para uso na avaliação da compactação do solo com ênfase na cultura da cana-de-açúcar. Alguns dos penetrômetros não são versáteis, pois apresentam problemas de padronização, oferecem dados primários e/ou indiretos que exigem trabalho manual de contabilização para obtenção e compilação dos resultados ou geram gráficos mecanicamente, quase sempre de forma imprecisa (SILVA, 2002).

O contínuo desenvolvimento dos penetrômetros buscando minimizar as dificuldades relacionadas, ao seu manuseio, à manutenção da velocidade de penetração constante e à aquisição e registro dos dados tem apresentado evoluções. Balastreire e Amaral (1994) construíram um penetrômetro eletrônico portátil, composto basicamente por um microprocessador para a aquisição de dados. Cappelli et al. (1995), também apresentaram um penetrômetro eletrônico para a determinação do índice de cone. Silva et al. (1998) construíram igualmente um penetrômetro hidráulico com aquisição eletrônica de dados. Já Lanças e Santos (1998) desenvolveram um penetrômetro hidráulico-eletrônico com controle de velocidade de penetração, independente da força resistente do solo, o que é praticamente impossível de se obter com os de acionamento manual. O equipamento também contava com sistema de aquisição eletrônica de dados e um sistema de georeferenciamento, o que possibilita fazer mapas de resistência à penetração, proporcionando indicativos da compactação do solo, sua espacialização e quantificação na área. Embora a grande variedade de instrumentos, existente só recentemente vem sendo utilizado por pesquisadores métodos automatizados que substituem os penetrômetros. Este refere-se ao uso de uma haste vertical instrumentada com sensores eletrônicos que pode ser tracionada através do solo e desta forma a mensuração da resistência ao corte em tempo real.

Alguns destes equipamentos foram desenvolvidos por Alihamsyah e Humphries (1991), que construíram um penetrômetro com ponteiras de formato cônico que operava na posição horizontal, montadas numa haste especialmente projetada, ligada a uma célula de carga para a determinação da resistência ao corte. Chukwu e Bowers (1999) desenvolveram um sensor para três camadas diferentes do solo baseados no equipamento e na utilização de ponteiras na posição horizontal desenvolvidos por Alihamsyah et al. (1991). Já Raper et al. (1999) criaram uma sonda de múltiplos penetrômetros de cone montada na parte traseira de um trator para automatizar o processo de amostragem e permitir o cálculo da média de cinco medidas.

Andrade et al. (2001) trabalharam uma haste estratificada com oito células de carga, que possibilitava a mensuração isolada da resistência de corte do solo, para cada uma das oito lâminas de corte. Já Adamchuk et al. (2001) utilizaram uma haste lisa vertical com extensômetros de resistência elétrica strain gages dispostos em diferentes níveis na parte traseira da haste para registrar as forças horizontais. Dando continuidade a seu

trabalho Andrade et al. (2002) apresentaram uma variação da haste construída em 2001, utilizando anéis de pressão ao invés de células de carga para mensurar a resistência ao corte do solo.

De acordo com Viacheslav et al. (2006), trabalhos nessa área têm demonstrado a viabilidade do seu uso na procura de uma solução alternativa ao uso do penetrômetro. Estes equipamentos podem produzir mapas que indicam a variabilidade espacial da resistência mecânica das áreas amostradas, em diferentes camadas, com resolução, densidade de amostragem e capacidade operacional mais elevada se comparada com levantamentos feitos com penetrômetros, mais, as principais limitações destes equipamentos custo operacional elevado, distúrbio excessivo do solo como também o teor de água no solo, conseqüentemente é necessário, um sistema simples e confiável para mapear a resistência mecânica do solo em várias profundidades e em tempo real.

Esta utilização crescente do penetrômetro pode-se atribuir à facilidade e rapidez na obtenção de amostragem, além do baixo custo com que numerosas medidas podem ser realizadas, são as principais vantagens do uso deste equipamento. De acordo com Bengough e Mullins (1990), 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.

Para Lanças (1996b), a resistência à penetração é um indicativo intermediário da compactação não sendo uma medição física direta das condições do solo, uma vez que seu valor é variável em função de outros fatores, principalmente de teor de água e do tipo de solo. Mantovani (1987) diz que além do teor de água, a textura do solo influi diretamente na resistência do solo à penetração e a utilidade de suas medidas somente pode ser comparada em solos do mesmo tipo e com mesmo teor de água. O estado de compactação dos solos agrícolas, apesar de ser fortemente influenciado pelo teor de água do solo, pode ser associado, de forma simplificada, a um índice de resistência à penetração de um cone padronizado, denominado índice de cone, obtido por um penetrômetro de cone (CAPPELLI et al., 2001).

A ASAE (1999) define índice de cone (IC) como sendo a força por unidade de área da base (kPa ou kgf/cm^2), necessária para empurrar o penetrômetro no solo, durante um pequeno deslocamento da ponta cônica e determinar que o início da leitura seja

feito no instante em que a base do cone seja introduzida numa velocidade de penetração constante de 30 mm/s.

Diversos autores verificaram que a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas situa-se entre 1 MPa e 3,5 MPa (CANARACHE et al., 1984; MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999; NESMITH, 1987; SENE et al., 1985). Já Carpenedo (1994) sugere que valores de resistência à penetração acima de 2,5 MPa começam a restringir o crescimento do sistema radicular das plantas. Para Tormena e Roloff (1996), valores de resistência à penetração de 3,5 a 6,5 MPa foram considerados como possíveis problemas de impedimento mecânico para o crescimento das raízes das plantas.

A variação desses valores críticos está associada ao tipo de planta, teor de argila do solo, sistema de condução do experimento e ao sistema de manejo do solo. Contudo, o valor de 2 MPa tem sido, geralmente, utilizado como um valor de resistência à penetração limitante (HAKANSSON et al., 1988; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

4.4 Compressibilidade do solo

A adoção de tecnologia agrícola voltadas para o cultivo de grandes áreas, intensificaram as operações motomecanizadas sobre o solo, refletindo na sua suscetibilidade à compactação, que torna-se crítica em condições de teor de água excessiva. Assim, é de extrema importância determinar o teor de água no solo para ser submetido às operações de cultivo ou de tráfego, bem como estimar quantitativamente o prejuízo causado à sua estrutura quando as pressões aplicadas excederem a sua capacidade de suporte (DIAS JUNIOR, 1994).

Inúmeros pesquisadores sugerem que a compactação do solo seja identificada, através de atributos do solo. Dentre os mais utilizados, Camargo e Alleoni (1997) fazem referência a: determinação da densidade do solo, condutividade hidráulica no campo e no laboratório, distribuição do tamanho de poros, resistência do solo à penetração, uso da micromorfologia e exame de trincheira, todos com a finalidade de verificar a existência de camadas de maior resistência e o potencial para o desenvolvimento das raízes.

De acordo com Dias Junior et al. (1999), estes atributos tradicionalmente usados apenas identificam as camadas compactadas sem, entretanto, quantificar a capacidade de suporte de carga dos solos, que pode ser usado como um indicativo das pressões que as raízes precisam fazer para se desenvolverem. Devido a grande variedade e interação de fatores envolvidos e visto a grande complexidade do tema, pesquisas sobre compressibilidade têm surgido no intuito de avaliar detalhadamente o processo de compressão quando determinada pressão externa é exercida ao solo.

Pesquisas na área de compactação do solo têm dado ênfase ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a previsão da compactação dos solos (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996). Um dos enfoques dessa modelagem tem considerado a pressão de preconsolidação do solo como sendo a propriedade que expressa a capacidade de suporte de carga dos solos parcialmente saturados (KONDO e DIAS JUNIOR, 1999). A pressão de preconsolidação indica, assim, uma variação da capacidade de suporte de carga dos solos em função das variações de teor de água (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; KONDO, 1998) devendo-se evitar a aplicação de cargas superiores à pressão de preconsolidação (LEBERT e HORN, 1991).

A pressão de preconsolidação é obtida da curva de compressão do solo, utilizando-se o método proposto por Casagrande (1936), que é basicamente gráfico, ou utilizando o método proposto por Dias Junior e Pierce, (1995), que faz uso de uma planilha eletrônica.

O termo compressibilidade indica a resistência do solo ao decréscimo de volume quando submetido a uma carga mecânica, sendo definido como a facilidade com que o solo diminui o volume quando uma determinada pressão é aplicada (HORN e LEBERT, 1994). Esta propriedade é uma das maneiras utilizadas para avaliar a compactação do solo.

Pesquisas sobre a compressibilidade têm surgido com o intuito de avaliar de forma detalhada o processo de compressão do solo (IMHOFF, 2002). Desta forma, a compressibilidade é a expressão quantitativa da resposta do solo à compactação. A compressibilidade depende primariamente das propriedades físico-mecânicas do solo (ETANA et al., 1997) e, em menor grau, do nível e do modo de aplicação da energia utilizada para exercer a compactação (FAUNE, 1981).

Algumas destas propriedades físico-mecânicas relativas ao comportamento compressivo do solo são obtidas com a curva de compressão (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996), representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios. Como exemplos dessas propriedades, citam-se o índice de compressão e a pressão de preconsolidação (SILVA et al., 2001).

O índice de compressão refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume do solo quando alguma pressão externa é aplicada, enquanto que a pressão de preconsolidação é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (LEBERT e HORN, 1991; DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

Oliveira et al. (2003) estudaram o comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho argiloso da região do cerrado, submetido a diferentes sistemas de uso ou manejo e diferentes tensões de água no solo, e verificaram que na profundidade de 0–5 cm, os índices de compressão foram diferentes, independentemente da tensão de água no solo (faixa de tensão de 6 e 1.500 kPa). Na reta de compressão do solo virgem, a variação da densidade do solo foi a mesma para qualquer tensão de água no solo. No entanto, os valores da densidade do solo final foram maiores à medida que aumentou o conteúdo de água no solo. Estes resultados revelaram uma tendência à maior deformação do solo sob cerrado para conteúdo de água mais elevado, o que está relacionado com sua menor densidade e com o maior espaço poroso disponível à deformação.

Dias Junior e Miranda (2000) observaram que, independentemente da classe de solo, à medida que a teor de água aumentava a densidade do solo também aumentava até atingir um valor máximo e, a seguir, diminuía devido à baixa compressibilidade da água. No ponto máximo, ou seja, no vértice da parábola, obteve-se o valor da densidade do solo máxima e da umidade ótima de compactação.

Segundo Larson e Gupta (1980), com a aplicação de pressões maiores do que a pressão de preconsolidação observa-se que alterações significativas ocorreram na estrutura do solo, evidenciadas pelas mudanças significativas dos valores de densidade do solo. Este fato pode ser explicado pelo aumento do número de contatos entre cada agregado com o aumento da pressão aplicada, até que os agregados se rompem e o solo adquire uma estrutura maciça.

A modelagem tem apresentado grande potencialidade para o entendimento do processo de compressão dos solos. Dias Junior e Pierce (1995) desenvolveram um modelo não linear que permite determinar a pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação adicional, baseando-se nos diferentes teores de umidade de solos de regiões temperadas. Kondo (1998) utilizou o modelo desenvolvido por Dias Junior e Pierce (1995), em Latossolos da região de Lavras, e demonstrou que a compressibilidade do solo é influenciada pelo sistema de manejo.

Estudos da capacidade de suporte ou compressibilidade do solo realizado por Dias Junior (1994), sugerem a utilização de modelos de compressibilidade com base na pressão de preconsolidação, que predizem a máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes umidades, sem causar compactação adicional, fornecendo, portanto, informações para a prevenção da compactação. Estes estudos têm mostrado que quando ensaios de compressão uniaxial são realizados em solos que não sofreram pressão prévia ou secagem e umedecimento, a relação entre a pressão aplicada e a densidade do solo é linear, e qualquer pressão aplicada pode provocar deformações (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

Entretanto, quando os ensaios são realizados em solos que já tinham uma história de manejo, as deformações resultantes poderão ser recuperáveis e não recuperáveis (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996; GUPTA et al., 1989; LEBERT e HORN, 1991). É na região da curva de compressão secundária que o solo deve ser cultivado ou trafegado, para que não ocorra compactação adicional, pois é este o componente da curva de compressão que reflete a história de manejo do solo (DIAS JUNIOR e PIERCE, 1996).

4.5 Geoestatística: conceitos e fundamentos gerais

Por muito tempo presumiu-se que, para um determinado tipo de solo, as propriedades físicas e químicas relacionadas a determinada profundidade poderiam ser expressas através da média e da variância, a partir de um número suficientemente grande de amostras (COUTO e KLAMT, 1999). Esse tipo de enfoque, baseado na estatística clássica, supõe que a variabilidade de determinada propriedade não contém referência à distribuição espacial das diferenças, dentro de uma mesma mancha de solo (TRANGMAR et al., 1985). A

estatística clássica baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local a outro são aleatórias (GASTON et al., 2001).

Segundo Morettin e Bussad (1987), as medidas estatísticas mais utilizadas para expressar a variabilidade de um conjunto de dados são a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude total, por serem fáceis de calcular e de se interpretar. Porém esses indicadores devem ser utilizados com certas restrições.

Guimarães (2000) mostra que a variância só poderá ser usada isoladamente, se forem comparados grupos de dados que possuem unidades iguais. O coeficiente de variação, que indica o grau de variabilidade do parâmetro, não reflete o seu significado físico, mas é bastante utilizado para comparar propriedades que possuam unidades diferentes. A amplitude total leva em consideração apenas os extremos, sendo, portanto, pouco utilizada.

Sokal e Rohlf (1969) afirmaram que os valores em um ponto são estimados levando-se em conta a média da população e a variabilidade dos valores medidos em torno da média. Essa estimativa pressupõe que as amostras sejam independentes e que possuam distribuição normal.

A variabilidade espacial de propriedades do solo vem sendo uma das preocupações de pesquisadores, praticamente desde o início de século. Vieira (2000) citou trabalhos de pesquisadores datados do início do século passado, como Smith em 1910, que estudou a disposição de parcelas no campo em experimentos de variedades de milho, em uma tentativa de eliminar o efeito de variações no solo. E assim, vários outros, como Robinson e Lloyd, em 1915 e Pendleton, em 1919, estudaram erros em amostragens e diferenças em solos de mesmo grupo. Waynick, em 1918, estudou a variabilidade espacial de nitrificação no solo. Waynick e Sharp, em 1919, estudaram o nitrogênio total e carbono no solo, todos com grande intensidade de amostras, nos mais variados esquemas de amostragem, mas sempre com a preocupação de caracterizar ou conhecer a variabilidade. Numa tentativa de encontrar uma maneira única de analisar uma vasta coleção de dados, Harris utilizou uma equação muito semelhante à que hoje conhecemos como variância de blocos, em 1920. Esses experimentos, entretanto, não tiveram continuidade no tempo, principalmente pela adoção da amostragem casualizada, que despreza coordenada geográfica, junto com a distribuição normal de frequências, assumindo a independência entre as amostras e assumindo o uso da média e do

desvio padrão para representação do fenômeno. Estes conceitos da estatística clássica podem ser encontrados nos trabalhos de Fisher (1958) e Snedecor e Cochran (1989).

Os métodos clássicos da estatística admitem a normalidade e a independência dos dados. Em experimentos agrônomicos, a variação devida ao solo pode ser superada por meio da casualização e da repetição, além do controle local, sendo os resultados analisados por meio de análise de variância. A conveniência desses métodos fez com que os estudos da variabilidade das propriedades dos solos não despertassem maiores interesses, até um momento relativamente recente, quando então começaram a ser retomados (GONÇALVES, 1998).

A motivação por estudos mais minuciosos da variabilidade de propriedades do solo revelou limitações das ferramentas estatísticas utilizadas até então pelas análises dos dados (GONÇALVES, 2000). Segundo Vieira (1997), quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial, deve-se utilizar um enfoque estatístico relativamente novo: a geoestatística. Segundo Lamparelli et al. (2001), a geoestatística é um conjunto de técnicas que estima valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de uma determinada área a ser estudada.

Segundo Vieira (2000), a geoestatística surgiu na África do Sul, quando Krige em 1951, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras. Assim, Matheron em 1963 e 1971, baseado nessas observações, desenvolveu uma teoria, a qual ele chamou de teoria das variáveis regionalizadas que contém os fundamentos da geoestatística. Posteriormente, a geoestatística foi aplicada nas indústrias de exploração de petróleo, e o sucesso da atividade estava ligado ao sucesso na aplicação de casos, uma vez que envolvia elevado capital, sendo as operações práticas baseadas na interpretação de dados espaciais. Assim a base da geoestatística foi elaborada. A partir desse momento, a aplicação das técnicas da geoestatística expandiu-se para diversas áreas da ciência da terra, servindo como uma ferramenta de tomadas de decisões e possibilidade de melhoria na caracterização e entendimento de certos fenômenos (CROMER, 1996)

Guerra (1988), afirma que a base da geoestatística vem da teoria das variáveis regionalizadas de Matheron. Segundo esta teoria, a diferença nos valores de uma

dada variável tomados em dois pontos no campo depende da distância entre eles. Assim, a diferença entre os valores do atributo tomados em dois pontos mais próximos no espaço deve ser menor do que a diferença entre os valores tomados em dois pontos mais distantes. Portanto, cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores de sua vizinhança, ilustrando uma continuidade espacial (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

O estudo da dependência espacial de atributos do solo ou da planta, através da geoestatística, permite a interpretação e a projeção dos resultados com base na análise da estrutura da sua variabilidade natural. Por exemplo, permite separar na resposta das culturas a proporção referente ao tratamento ou manejo, daquela correspondente as diferenças de solos entre pontos de um mesmo campo (VIEIRA, 2000).

Uma etapa fundamental que antecede a análise geoestatística é a realização de uma criteriosa análise exploratória dos dados. É uma etapa precursora introduzida para averiguar as propriedades estatísticas e matemáticas dos dados (BURROUGH at al., 1997). Deve-se verificar a normalidade dos dados, verificar se há candidatos a dados discrepantes ou se há a necessidade da transformação dos dados para a sua normalização (GONÇALVES et al., 1999). São calculadas as medidas de peso (média, mediana, valor máximo e mínimo, quartis superior e inferior, amplitude e amplitude interquartil), dispersão (desvio padrão, variância e coeficiente de variação) e forma da dispersão (assimetria e curtose).

Anteriormente a análise de dados, era realizada sob a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória. para permitir o uso de métodos estatísticos como análise de variância e parâmetros como o coeficiente de variação. Entretanto, este tipo de hipótese não pode simplesmente ser feito antes que se prove a não existência de correlação de amostras com a distância. Se provada a correlação espacial, a hipótese de independência fracassa (HARRADINE, 1949). Um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo, de amostras vizinhas é através da autocorrelação. Quando a amostragem envolve duas direções (x_i , y_i) o instrumento mais indicado na estimativa da dependência entre amostras é o semivariograma (SILVA, 1988).

O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa e mapear valores para locais não amostrados, estimando os valores por meio de

técnicas de interpolação, mais comumente através da técnica de krigagem (SALVIANO et al., 1998).

Segundo Davis et al. (1995), o semivariograma é uma ferramenta da geoestatística, pautado na hipótese da estacionaridade da variância, sendo utilizado para descrever a dependência espacial entre observações, com base na teoria das variáveis regionalizadas.

O semivariograma é, por definição:

$$\gamma(h) = 1/2E \{Z(\chi_1) - Z(\chi_1+h)\}^2 \quad \text{Eq. 1}$$

e pode ser estimado por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(\chi_i) - Z(\chi_i+h)]^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$\gamma(h)$ é a semivariância para o intervalo h ,

$N(h)$ é o número de pares de dados que distam h entre eles,

$Z(x_i)-Z(x_{i+h})$ é o valor da diferença de um par de dados que distam h entre eles.

Camargo e Alleoni (1997) mostram na Figura 1 um semivariograma com características bem próximas do ideal. O seu comportamento representa o que, intuitivamente, se deve esperar de dados de campo. Espera-se que: as diferenças $[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]$ decresçam assim que a distância (h) que os separa, decresça; as medições localizadas próximas sejam mais parecidas entre si do que aquelas separadas por grandes distâncias; e que $\gamma(h)$ aumente com a distância h . Por definição, $\gamma(0)=0$, como pode ser visto pela Equação 7, quando $h=0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para $\gamma(\text{zero})$, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita e que recebe o símbolo C_0 . O valor de C_0 revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte dessa descontinuidade pode ser também devido a erros de medição, mas é impossível quantificar qual contribui mais, se os erros de medição ou variabilidade a uma escala menor do que aquela amostrada.

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados diretamente da Figura 1:

- Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.
- Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Desse ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$) toma-se invariante com a distância .
- Efeito Pepita (C_0): por definição $\gamma(0)=0$. Na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita (C_0). O valor de C_0 revela a descontinuidade do semivariograma para distância menor do que a menor distância entre as amostras.

Contribuição (C_1): é a diferença entre o Patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

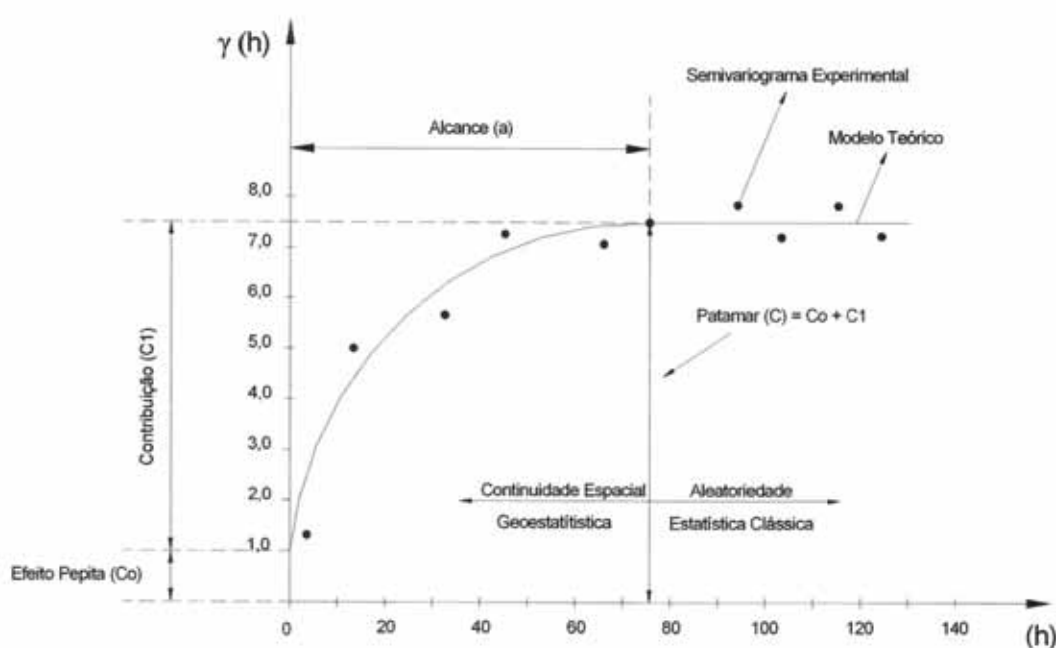


Figura 1. Semivariograma experimental, modelo teórico e o semivariograma típico e seus componentes (Adaptado de Oliveira, 2003).

O semivariograma é o instrumento que determina a dependência espacial para as amostras, quando algum modelo é ajustado ao mesmo. O procedimento de ajuste do modelo não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim interativo, pois nesse processo o interprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependem do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório (ZANIN et al., 1998). Para Isaaks e Srivastava (1989), são três os parâmetros principais na determinação de um modelo geoestatística. O primeiro é o alcance, em seguida o patamar e por último o efeito pepita.

Dependendo do comportamento da semivariância $\gamma(h)$ para altos valores de h , os modelos podem ser classificados em: modelos com patamar e modelos sem patamar. Os modelos com patamar normalmente são ajustes que representam a estacionarilidade de segunda ordem, onde a semivariância aumenta com o aumento da distância entre amostras, até atingir o patamar onde se estabiliza (MACHADO, 1994). Já os modelos sem patamar satisfazem apenas a hipótese intrínseca e os semivariogramas podem ser definidos, mas não se estabilizam em nenhum patamar.

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas e podem ser uma das maiores fontes de ambigüidade e polêmica nessas aplicações. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada. Por isso, se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também estarão. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\gamma(h)$ em relação a h (VIEIRA et al., 1981).

Modelos com patamar

Nos modelos seguintes, C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar e a é o alcance do semivariograma.

a) Modelo linear (Lin):

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{a} h \quad 0 < h < a \quad \text{Eq. 3}$$

$$\gamma(h) - C_0 + C_1 \quad h > a \quad \text{Eq. 4}$$

Onde C_1/a é o coeficiente angular para $0 < h < a$. Nesse modelo, o patamar é determinado por inspeção; o coeficiente angular, C_1/a , é determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de $\gamma(h)$, dando-se maior peso aqueles que correspondem ao maior número de pares; o efeito pepita, C_0 , é determinado pela interseção da reta no eixo $\gamma(h)$; o alcance, a , é o valor de h correspondente ao cruzamento da reta inicial com o patamar; e $C_1 = \text{patamar} - C_0$.

b) Modelo esférico (Esf):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad \text{Eq. 5}$$

$$\gamma(h) - C_0 + C_1 \quad h > a \quad \text{Eq. 6}$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa reta cruzará o patamar à distância, $a' = 2/3 a$. Assim, o alcance, a , será $a = 3 a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3 a$.

Modelo exponencial (Exp):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right] \quad 0 < h < d \quad \text{Eq. 7}$$

Onde: d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o

semivariograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C_1 para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

Modelo gaussiano (Gau):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right] \right] \quad 0 < h < d \quad \text{Eq. 8}$$

Modelos sem patamar

Esses modelos correspondem a fenômenos que tem uma capacidade infinita de dispersão e, por isso, não tem variância finita e a covariância não pode ser definida. Podem ser escritos da seguinte maneira:

$$\gamma(h) = 1/2E \{Z(\chi_1) - Z(\chi_1+h)\}^2 \quad \text{Eq. 9}$$

O parâmetro E tem que ser estritamente maior que zero e menor que 2, a fim de garantir que o semivariograma tenha positivamente definida condicional.

Segundo Vieira (2000), alguns fenômenos podem ter semivariogramas que mostram estrutura entrelaçada, ou seja, mais de um patamar e mais de um alcance. Isto acontece quando se tem diferente escala de variabilidade nos dados. Em situações como esta, é necessário ajustar mais de um modelo, ou um modelo para cada estrutura, pois, um modelo único não é suficiente para representar o semivariograma.

Trangmar et al. (1985) sugeriram a relação do efeito pepita pelo patamar para mensurar o grau de dependência espacial, denominado de índice de dependência espacial. De acordo com Cambardella et al. (1994), o grau de dependência espacial pode ser classificado de acordo com os seguintes critérios propostos. Semivariância que apresentam efeito pepita menor ou igual a 25 % do patamar tem forte dependência espacial. A dependência é moderada quando esta relação variar de 25 a 75 % e fraca quando o efeito pepita for superior a 75% do patamar.

Na maioria das vezes o interesse da análise não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados. O interesse pode ser em um ou mais pontos específicos da área ou obter uma malha de pontos interpolados que permitam visualizar o comportamento da variável na região através de um mapa de isolinhas ou desenho de uma superfície. Para se obter este maior detalhamento da área em estudo é necessário um interpolador (LEITE, 2001).

Diversos são os métodos de interpolação existentes, pode-se citar: método poligonal, triangulação, médias locais das amostras e inverso do quadrado das distâncias. De modo geral, estes interpoladores são simples e de cálculo relativamente fácil e limitado (ALMEIDA e RIBEIRO JÚNIOR, 1996).

A krigagem é o método de interpolação da geoestatística, que utiliza a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Estas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo (BURGESS e WEBSTER, 1980). O termo krigagem foi uma homenagem de Matheron a Krige, por desenvolver o método em 1963. Através dele pode-se atingir um dos objetivos centrais dos estudos sobre variabilidade espacial, que é obter, a partir de observações pontuais, informações para grandes áreas de terra, tais como de cultivo, baseadas nas observações da variável a ser estimada em locais não amostrados.

Segundo Rossi et al. (1994), três características da krigagem a distinguem dos outros métodos de interpolação. São elas: fornecer uma estimativa maior ou menor que o valor das amostras, sendo as técnicas tradicionais restritas as faixas de variações das amostras; tem a vantagem de usar a distância e a geometria entre as amostras, enquanto que os métodos tradicionais usam distâncias euclidianas para avaliar as amostras; e, diferente dos métodos tradicionais, a krigagem leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, expresso pelo semivariograma.

Existem diversos tipos de krigagem: a simples, ordinária, universal, indicadora, probabilística, entre outras. A krigagem ordinária se distingue das demais por ser uma técnica de estimativa linear para uma variável regionalizada que satisfaz a hipótese intrínseca. Em contraste com a krigagem simples que, sob hipótese da estacionaridade de

segunda ordem, exige que a média seja conhecida, neste caso a média é desconhecida. Na krigagem ordinária é assumida a hipótese de quase estacionaridade, também conhecida como estacionaridade regional.

A krigagem ordinária, que é a variação mais utilizada da Krigagem, descrita por Trangmar et al. (1985), em que o valor interpolado de uma variável regionalizada $Z(x_0)$, num local x_0 , pode ser determinado por:

$$Z(x_0) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad \text{Eq. 10}$$

em que:

$Z(x_0)$ = valor estimado para local x_0 não amostrado;

$Z(x_i)$ = valor obtido por amostragem no campo; e

λ_i = peso associado ao valor medido na posição x_i

A construção do estimador Z , na Krigagem Ordinária, não requer o conhecimento inicial da média estacionária da amostragem (LANDIM, 1998), mas requer que a soma dos pesos seja igual a um (UZUMAKI, 1994).

5 MATERIAL E METÓDOS

5.1 Caracterização das áreas experimentais

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

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

Foram selecionados diferentes tipos de solos de maior ocorrência na Fazenda Experimental Lageado. Cada tipo de solo foi devidamente caracterizado e georeferenciado. Por ocasião da instalação do experimento, as áreas selecionadas foram dessecadas com aplicação de herbicida de princípio ativo Glyphosate, para evitar a possibilidade de infestação de plantas daninhas durante os ensaios.

A primeira área experimental, designada como "Área 1", tem como coordenadas geográficas 22° 51' 20" Latitude Sul, 48° 26' 08" Longitude Oeste e altitude de 822 m. O solo dessa área corresponde à classificação LATOSSOLO VERMELHO escuro de acordo com Carvalho et al. (1983), e na classificação da EMBRAPA (1999), corresponde a LATOSSOLO VERMELHO (LV). Com textura média, teores de argila entre 15 a 35 %, e

elevado grau de intemperização. O relevo é predominantemente suave ondulado. Ocupam as partes mais elevadas da Fazenda Experimental Lageado e, representam 9,1 % da área total. A área utilizada para o estudo foi de 6.129 m², encontrava-se coberta por vegetação espontânea, com predominância de gramíneas com vários anos sem ser cultivada, apresentando uma condição de superfície de solo agrícola firme sem preparo (Figura 2).



Figura 2. Vista geral da Área 1.

A segunda área experimental, designada como “Área 2”, cujas coordenadas geográficas correspondem a: 22° 51' 08" Latitude Sul, 48° 25' 41" Longitude Oeste e altitude de 751 m. De acordo com Carvalho et al. (1983), o solo foi classificado como ALUVIAL e na classificação da EMBRAPA (1999) como NEOSSOLO FLÚVICO (RU). É oriundo de materiais não consolidados, de deposição recente, desenvolvidos sob relevo plano, revelando camadas nitidamente estratificadas, ou seja, extratos granulometricamente muito distintos, podendo aparecer camadas argilosas sobrepostas a camadas arenosas ou vice-versa. Embora cerca de 4,6 % da área da fazenda seja ocupada por esta classificação de solo, apenas uma pequena parcela destes tem sido utilizada. A superfície utilizada para o estudo na Área 2 foi de 10.778 m², a mesma estava sendo cultivada, há vários anos, com a cultura de milho, empregando-se, ininterruptamente, o sistema convencional de preparo do solo (aração e gradagem). Na ocasião da instalação do experimento, o solo encontrava-se coberto por massa de palha de milho e braquiária (Figura 3).



Figura 3. Vista geral da Área 2.

A terceira área experimental, designada como “Área 3”, esta localizada geograficamente a: 22° 48' 23" Latitude Sul, 48° 25' 43" Longitude Oeste e altitude de 744 m. Possui um solo classificado, como TERRA ROXA estruturada distroférico, de acordo com Carvalho et al. (1983). Na classificação da EMBRAPA (1999), corresponde a um NITOSSOLO VERMELHO distroférico, de textura argilosa, com teores de argila superiores a 50 %. A mesma apresenta um relevo relativamente plano e representa cerca de 42,1 % da área total da fazenda. Para a realização do estudo foi demarcada uma superfície de 14.432 m², que vem sendo manejada em sistema de plantio direto (milho-soja no verão e trigo-aveia no inverno) e pertence à área de produção comercial da fazenda. Na ocasião da instalação do experimento, o solo encontrava-se coberto por palha de milho (Figura 4).



Figura 4. Vista geral da Área 3.

A última área experimental, designada como “Área 4”, esta localizada geograficamente a: 22° 50' 24" Latitude Sul, 48° 25' 23" Longitude Oeste e altitude de 791 m. Esta área possui a mesma classificação de solo que a Área 3. A área utilizada para o estudo foi de 8.066 m² e encontrava-se coberta por capim, a mesma não vem sendo cultivada há vários anos, permanecendo em pousio, ou seja, sem o trânsito de máquinas (Figura 5).



Figura 5. Vista geral da Área 4.

5.2 Determinação da resistência do solo à penetração (RP).

A amostragem de solo das áreas para o levantamento da resistência do solo à penetração (RP) foi realizada com um penetrômetro hidráulico-eletrônico, desenvolvido no NEMPA, Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas do Departamento de Engenharia Rural, da FCA/UNESP, Campus de Botucatu/SP.

O penetrômetro é constituído de um cilindro hidráulico, uma haste com cone sólido na ponta a qual obedeceu as características estruturais e operacionais definidas pela norma ASAE S313.3 (1999). A haste está conectada a uma célula de carga com capacidade de 2.000 kg e a um sensor de profundidade do tipo potenciométrico linear, ambos ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados compostos pelo Microllogger CR23X, da Campbell Cientific. O penetrômetro está instalado na Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) que pode ser transportado por rodovias, tracionada por carros e

caminhonetes e durante a operação utiliza como fonte de potência a tomada do controle remoto do trator agrícola (Figura 6).



Figura 6. Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) utilizada para levantamento da resistência do solo à penetração, amostragem do solo e georeferenciamento dos pontos.

A alocação dos pontos amostrais foi obtida, utilizando-se um receptor de GPS, AG132, Trimble, um programa com algoritmos matemáticos para correção diferencial em tempo real e uma antena dupla para captação do sinal do satélite. A navegação no campo foi feita por meio do programa SST FieldRover II (SST Development Group, inc.), executado através de um computador de mão iPaq (Compaq 3700) conectado ao receptor GPS.

O sistema conta ainda com uma barra de luz com a finalidade de guiar o operador a se manter numa direção em linha reta e um sensor de roda que possibilita um sinal sonoro informando desta forma o ponto amostral previamente selecionado.

Para avaliar a ocorrência e distribuição da compactação, bem como a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração (RP) que medida através do índice de cone, durante as estações secas e chuvosas, foram adotadas cinco (5) faixas de variação de umidades para cada área estudada.

A grade amostral do índice de cone (IC) foi feita de modo a proporcionar a abrangência de toda a área e, o maior número de pontos possíveis. Foi utilizada uma amostragem sistemática em malha de 10 x 10 m, nas camadas de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30; 0,30 a 0,40 m e mais profundas do que 0,40 m. Assim, considerando-se as superfícies e formas das áreas serem diferentes, foi necessário a utilização de um número de pontos amostrais diferenciados para cada uma delas, conforme pode ser observado na Figura 7.

A determinação do teor de água do solo foi monitorado durante a avaliação do índice de cone (IC), em duas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, utilizando-se a mesma grade amostral do índice de cone (IC). Para a análise do teor de água foi utilizado o 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.

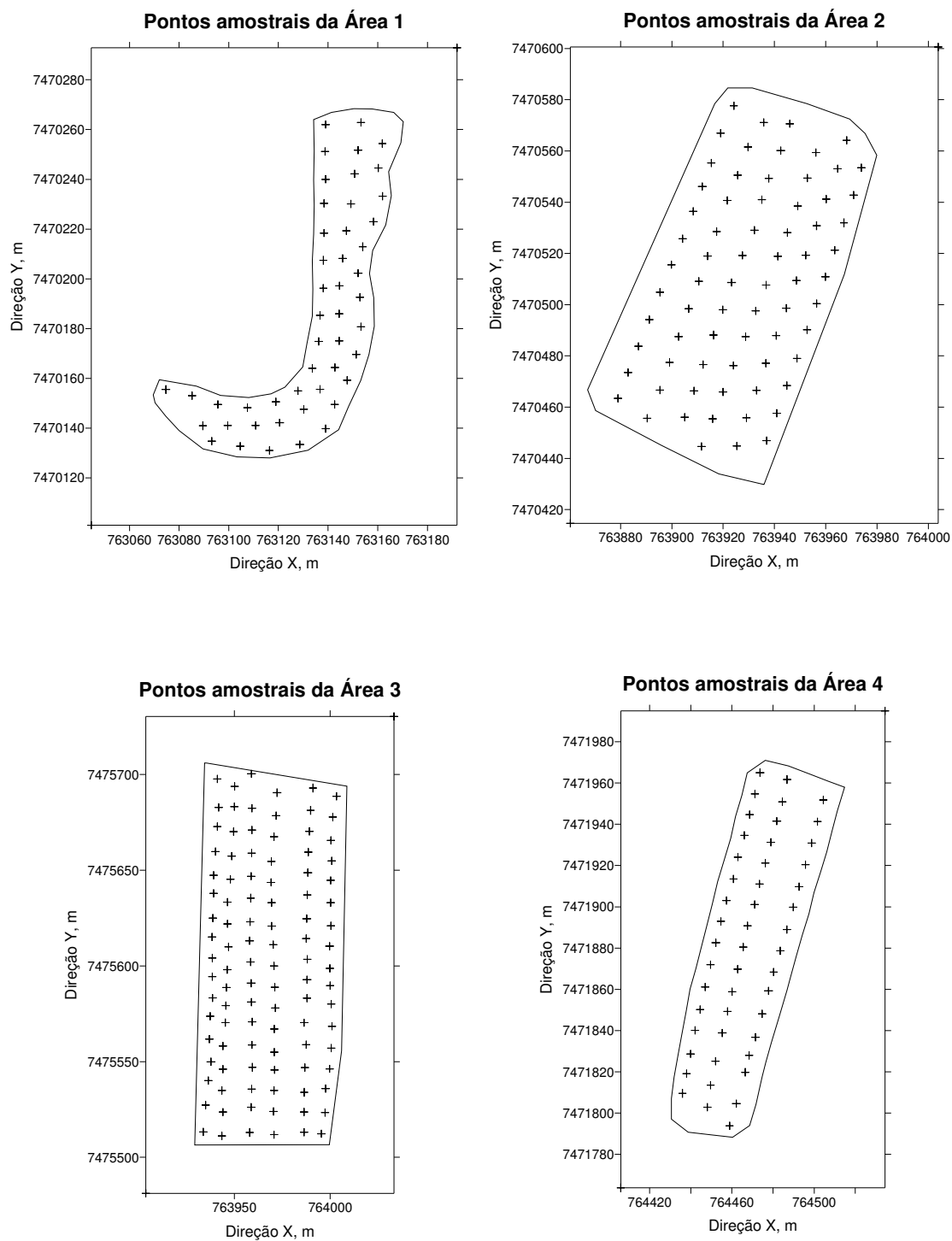


Figura 7. Espacialização dos pontos amostrados das áreas para elaboração dos mapas de capacidade de suporte de carga do solo.

5.2.1 Análise geoestatística

Para analisar os dados, primeiramente foi realizada uma análise exploratória, com a finalidade de descrever os parâmetros estatísticos, que auxiliam na identificação da tendência, dispersão e forma de distribuição dos dados (homogeneidade e normalidade). Nesta análise, assumiu-se que as observações eram independentes espacialmente, ou seja, as variações de um lugar para outro são consideradas aleatórias, não levando em conta suas posições.

Com esta análise verificou-se principalmente se existia alguma discrepância entre o valor mínimo e máximo, e se os dados apresentavam distribuição normal (valores dos coeficientes de assimetria e curtose próximas de zero) ou não. Quando um conjunto de dados aproxima-se da distribuição normal, os valores de assimetria e curtose por sua vez, aproximam-se de zero (VIEIRA, 2000).

De acordo com Mead e Curnow (1983), quando alguns dados não se enquadram a uma distribuição normal implica na limitação da utilização de métodos oriundos da estatística clássica, para o qual esse requisito é básico. Segundo alguns autores (EGUCHI, 2001; FARIAS, 1999; QUEIROZ, 1995 e VIEIRA, 1997), se a distribuição não é normal, significa que a média aritmética é uma medida bastante influenciada pelos valores extremos, não sendo uma medida de tendência central representativa do conjunto de dados. Ao contrário, quando os dados se ajustam próximos à distribuição normal, a média aritmética pode ser considerada uma medida de tendência central representativa do conjunto de dados, podendo ser utilizada no sistema de manejo do solo (CARVALHO, 1991 e SILVA et al., 2001).

Inicialmente, os dados de cada área estudada foram analisados pelo cálculo dos momentos estatísticos clássicos. Sendo os parâmetros considerados a média, variância, desvio padrão (DP) coeficiente de variação (CV), mínimo, máximo, moda, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. Utilizando-se o programa computacional NCSS/PASS 2000.

A variabilidade dos dados do índice de cone (IC) foi classificada em função do seu coeficiente de variação (CV), de acordo com o critério proposto por Warrick e Nielsen (1980), que consideraram: variabilidade baixa ($CV < 12\%$); média ($12\% < CV < 60\%$) e alta ($CV > 60\%$). Igualmente, e de acordo com os mesmos autores, alguns atributos do

solo podem apresentar CV entre 10 e 100 %. Segundo Landim (2003), o CV fornece uma medida relativa da precisão do experimento, sendo bastante útil na avaliação da dispersão dos dados.

A partir dos dados já ordenados, foi realizada a análise espacial dos dados através da geoestatística por intermédio do programa GS+Geostatistics (Gamma Design Software), que utiliza os valores da variável em estudo, levando em consideração os vizinhos mais próximos, com suas respectivas coordenadas de campo para a construção dos semivariogramas e os modelos teóricos que melhor caracterizava o fenômeno nas áreas estudadas.

Para Isaaks e Srivastava (1989), mais importante do que a normalidade dos dados é que os semivariogramas apresentassem patamares bem definidos, ou seja, ocorra a estacionaridade dos dados e que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem, as quais são baseadas nos valores médios.

Para o tratamento geoestatístico dos dados do índice de cone como do conteúdo de água no solo, para cada área analisada, foram considerados todos os dados que apresentavam uma distribuição de frequências normal, como também aqueles dados que se afastavam de uma distribuição normal. Esta opção se deve simplesmente ao fato dos semivariogramas dos dados originais terem apresentado melhores condições quanto à expressão da dependência espacial.

O grau de dependência espacial foi determinado segundo Cambardella et al. (1994), o qual estabelece que quando o valor percentual do efeito pepita em relação ao valor máximo da semivariância é menor do que 25 %, a dependência pode ser considerada forte, quando esta relação assume grandezas entre 25 a 75 %, moderada e, quando ela apresenta-se maior do que 75%, fraca. Através da técnica de interpolação Krigagem foram construídos os mapas de isocompactação com o auxílio do programa Surfer 8.0 (Goldem Software, inc) para cada uma das áreas estudadas.

Finalmente, os valores interpolados foram utilizados na análise de regressão entre os fatores, no qual foi ajustado o modelo que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2). Foi utilizado o programa estatístico NCSS/PASS 2000 para a execução da

correlação e ajuste dos modelos. A correlação efetuada relacionou-se ao índice de cone (IC) com os teores de água.

Assim, uma perfeita correlação entre duas variáveis deve possuir um coeficiente de correlação (r) igual a 1,0 (correlação direta) ou -1,0 (correlação inversa). Tal situação torna-se praticamente impossível. Assim, os valores de tal coeficiente foram classificados de acordo com o proposto por Kitamura (2004) como: a) extra-alto: se $0,80 \leq r \leq 1,00$ ou $-0,80 \leq r \leq -1,0$; b) alto: se $0,60 \leq r < 0,80$ ou $-0,60 \leq r < -0,80$; c) moderado: se $0,40 \leq r < 0,60$ ou $-0,40 \leq r < -0,60$; d) baixo: se $0,20 \leq r < 0,40$ ou $-0,20 \leq r < -0,40$; e, e) nulo: se $0,0 \leq r < 0,20$ ou $-0,0 \leq r < 0,20$. Segundo o mesmo autor, uma excelente correlação linear entre duas variáveis deve possuir um coeficiente de correlação com valores, no mínimo, superior a +0,60 (correlação positiva) e -0,60 (correlação negativa).

5.3 Obtenção do modelo de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS)

Neste estudo, considerou-se as propriedades físicas do solo, no que diz respeito às relações e interrelações com a estrutura de solo que ajudam a um melhor entendimento do processo de compactação do solo, sendo estas: Densidade de partícula (D_p), Limite de consistência do solo, Densidade do solo inicial (D_{si}), Densidade do solo na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$), Porosidade do solo inicial (P_i), Porosidade do solo na pressão de preconsolidação (P_{σ_p}) e teor de água do solo.

A pressão de preconsolidação (σ_p) é um indicador de quanta carga e, ou pressão de contato o solo pode receber sem que sofra compactação adicional. Obtida de uma curva de tensão “versus” deformação (curva de compressão do solo, a qual representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo) a preconsolidação tem sido apresentada como uma alternativa para medir a capacidade de suporte de carga dos solos agrícolas (SILVA et al., 2003).

5.3.1 Esquema de amostragem e coleta de dados

Para a realização deste estudo, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas. As amostras deformadas foram usadas nas determinações do limite de

consistência do solo, densidade de partícula. As amostras indeformadas nas determinações de densidade do solo, porosidade do solo e para o ensaio de compressibilidade.

Todas as amostras foram coletadas nas camadas de 0 a 0,20 m e nas profundidades de 0,20 a 0,40 m, em razão da primeira camada possuir valores mais elevados de matéria orgânica, densidade do solo mais reduzida e, portanto, mais predisposta aos fatores externos de compactação, enquanto que, a segunda camada, mais protegida dos fatores externos e diretos de compactação, apresenta valores mais reduzidos de matéria orgânica e valores de densidade do solo mais elevado.

A estratégia de amostragem dos solos foi feita de maneira a proporcionar a abrangência de cada uma das áreas em estudo e o maior número de informações possíveis. Em decorrência desta situação foi necessário utilizar uma densidade amostral diferente para cada área, em função destas apresentarem superfícies e formas diferentes.

Para satisfazer essas condições foram utilizadas duas (2) amostragens sistemáticas em malha retangular de 10 x 20 m para as Áreas 1 e 3, e outra malha retangular de 10 x 40 m para as Áreas 2 e 4, perfazendo 20 pontos de coleta de dados e duas (2) profundidades. Como foram analisados quatro (4) tipos de solos diferentes o número total de amostras indeformadas ensaiadas foram de 160. Todos os pontos foram georeferenciados com o sistema de GPS.

Para a coleta de amostras indeformadas foram utilizados anéis de aço inoxidável, com diâmetro aproximado de 69,5 x 25 mm de altura, os quais são compatíveis com os encaixes que acompanham o consolidômetro. Estes foram extraídos do solo com o auxílio de um amostrador hidráulico desenvolvido especificamente para esse fim (Figura 8).

As amostras foram devidamente impermeabilizadas com papel filme e parafina, com o objetivo de manter o teor de água de campo para logo serem encaminhados ao laboratório. Dessa forma é mantido o histórico de tensão da amostra, ou seja, manter a estrutura do solo como encontrada no campo.

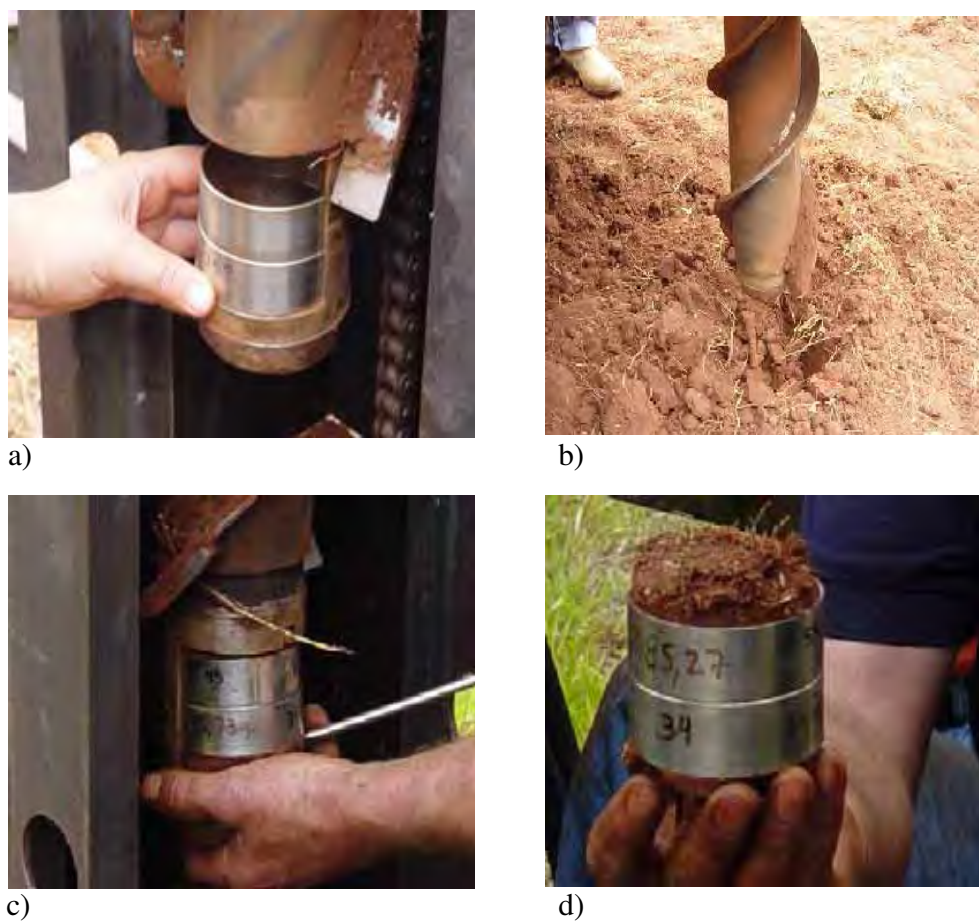


Figura 8. Detalhe do processo de amostragem do solo, com o amostrador hidráulico para os ensaios de compressibilidade. a) montagem dos anéis no amostrador; b) amostrador em funcionamento; c) retirada dos anéis com as amostras; d) anéis com a amostra, sendo o conteúdo do anel superior utilizado com amostra deformada e o anel inferior após retirado do excesso, será a amostra indeformada.

5.3.2 Densidade de partícula (D_p)

A densidade de partícula (D_p) foi determinada através do método do balão volumétrico, com álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

5.3.3 Densidade de solo (Ds).

A densidade do solo inicial (D_{si}), isto é, na condição em que se encontrava o solo no momento da amostragem (histórico do manejo do solo), foi determinada através do método do anel volumétrico.

$$D_s = \left(\frac{M_s}{V_s} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

Onde,

D_s = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

M_s = massa do solo seco (Mg);

V_s = volume do solo contido no cilindro (cm^3).

Na avaliação da densidade do solo na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$) as amostras indeformadas receberam pressões equivalentes à pressão de preconsolidação (σ_p), buscando-se quantificar o grau de consolidação máxima (crítica) que o solo pode atingir, sem que a sua estrutura fosse comprometida de forma irremediável.

5.3.4 Porosidade no solo (P)

A porosidade do solo inicial (P_i) assim como a densidade do solo inicial (D_{si}) foi avaliada levando em conta o estado natural do solo no momento da amostragem.

$$P = \left[1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \right] \quad \text{Eq. 12}$$

Onde,

P = porosidade ($m^3\ m^{-3}$);

D_s = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$);

D_p = densidade de partículas do solo ($Mg\ m^{-3}$).

A porosidade do solo na pressão de preconsolidação ($P_{\sigma p}$), foi determinada após o solo receber pressões equivalentes à pressão de preconsolidação, que simulara a pressão de contato máxima que pode ser aplicada ao solo sem implicar em danos irreversíveis à sua estrutura. Neste estudo, a forma de interpretar esta propriedade assim como a densidade do solo inicial (D_{si}) está sendo sugerida como um indicativo do quanto de espaços de vazios (porosidade mínima ou crítica) ou a relação entre massa e o volume o solo pode atingir, de maneira que a sua estrutura não seja comprometida.

5.3.5 Teor de água no solo

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

$$U = \left[\left(\frac{Ma - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \times 100 \right] \quad \text{Eq. 13}$$

Onde,

U = umidade na base de peso ou umidade gravimétrica (% ou kg kg^{-1});

Ma = massa de água (kg);

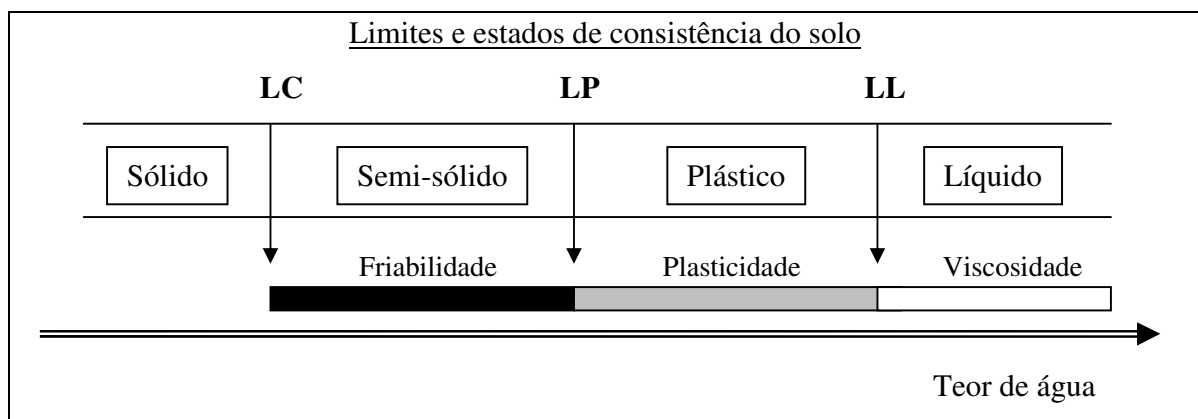
M_{ss} = massa de solo seco a $105-110^{\circ}\text{C}$ (kg).

5.3.6 Limites de consistência do solo.

Os limites de consistência do solo definidos por Atterberg (1911) foram determinados de acordo com Sowers (1965) e Dias Júnior e Miranda (1998) e representam o teor de água do estado de consistência em que o solo se encontra, podendo ser os limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC) (Figura 9).

A partir destes limites identificaram-se os estados ou regiões de consistência importantes para o tráfego agrícola ou preparo do solo: região de friabilidade (RF) que representa a faixa de teor de água entre o limite de contração e o limite plástico, na qual o solo pode ser trafegado, pois menores danos são causados à estrutura do solo. Região de plasticidade (RP) que representa a faixa de teor de água entre o limite plástico e o limite de

liquidez, não recomendada para o tráfego e, ou preparo do solo, pois, nessa condição, o solo pode sofrer deformações não-recuperáveis, (KONDO e DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA, 2002).



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

Figura 9. Representação esquemática dos estados e limites de consistência do solo. Limites de liquidez (LL), plasticidade (LP) e de contração (LC).

5.3.7 Obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p)

A determinação da pressão de preconsolidação (σ_p) foi feita a partir dos ensaios de compressibilidade uniaxial, que consistiu basicamente em aplicar sucessiva e continuamente pressões crescentes e preestabelecidas em um corpo de prova, (solo contido nos anéis) através de um consolidômetro, desenvolvido por Silva et al. (2005).

Para a realização dos ensaios de compressibilidade no laboratório, as amostras indeformadas, que foram coletadas em cada uma das áreas estudadas, foram devidamente preparadas e saturadas por capilaridade com água destilada. Após 48 horas, as amostras foram equilibradas naturalmente à temperatura ambiente em cinco (5) teores de água com quatro (4) repetições em duas (2) profundidades, totalizando quarenta (40) amostras indeformadas para cada área estudada.

Os teores de água considerados para realização do ensaio de compressibilidade foram nas seguintes condições: saturada, seca (5 % de teor de água) e na região de friabilidade de cada solo estudado (Tabela 1). Estas faixas de teor de água foram

definidas com base nos limites de consistência do solo (limite de liquidez - LL, limite de plasticidade - LP e limite de contração LC) para cada uma das áreas.

Tabela 1. Teor de água considerado nos ensaios de compressibilidade para cada área.

| Áreas estudadas | Saturado (%) | Região de friabilidade (%) | | | Seco (%) |
|-----------------|--------------|----------------------------|----|----|----------|
| Área 1 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
| Área 2 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
| Área 3 | 40 | 35 | 25 | 15 | 5 |
| Área 4 | 35 | 30 | 25 | 15 | 5 |

Depois de equilibradas as amostras, nos cinco (5) teores de água desejadas, elas foram submetidas a ensaios uniaxiais no consolidômetro, cuja aplicação das pressões se faz através da utilização de ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra seguindo a metodologia proposta por Dias Junior (1994), preconiza a aplicação dos seguintes níveis de pressão: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa (Figura 10), até que 90% da deformação máxima na amostra for obtida (TAYLOR, 1971).

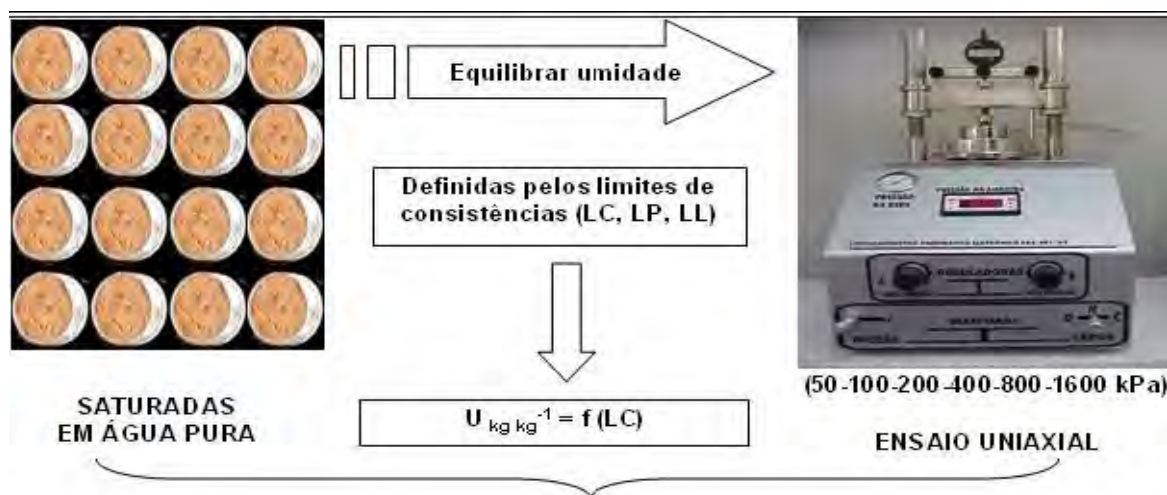


Figura 10. Procedimentos laboratoriais para realização dos ensaios de compressibilidade e obtenção da pressão de preconsolidação (σ_p). Consolidômetro desenvolvido por Silva et al. (2005).

Através destes ensaios foi possível obter as curvas de compressão do solo, e a partir destas, foram obtidas as pressões de preconsolidação (σ_p), de acordo com Dias Junior e Pierce (1995), que utiliza uma planilha eletrônica; ajustada em função do teor de água (U). Cada modelo de capacidade de suporte de carga do solo (CSCS), em função de cinco (5) teores de água.

$$\sigma_p = 10^{(a+bU)} \quad \text{Eq. 14}$$

Sendo,

σ_p = pressão de preconsolidação (kPa);

U = teor de água (kg kg^{-1});

a e b = parâmetros de ajuste.

Finalmente para avaliar a influência temporal do teor de água (U) do solo na sua resistência à penetração (RP) medida através do índice de cone (IC), foi preciso relacionar a pressão de preconsolidação (σ_p) com o índice de cone, através da equação $\sigma_p = a + b$ (IC), para todas as camadas do índice de cone analisadas em cada área estudada. Em seguida, foi utilizado o procedimento proposto por Snedecor e Cochran (1989) para comparar as equações obtidas nas diferentes profundidades analisadas em cada área.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Área 1

Na busca por diagnosticar o comportamento espacial do índice de cone em função da variação do teor de água no solo, foram realizadas as análises descritiva e espacial (Semivariogramas), as quais se encontram inseridas em um contexto mais amplo da análise exploratória que teve por objetivo facilitar o entendimento do conjunto de dados, indicando a forma de distribuição, dos padrões espaciais.

Considerando o exposto anteriormente, na Tabela 2, são apresentados os resultados da estatística descritiva para os valores do índice de cone nas diferentes profundidades e teor de água, das diferentes épocas de amostragens.

Pode-se observar que todas as profundidades do índice de cone apresentaram uma assimetria positiva. Entretanto, com o teor de água, não aconteceu o mesmo, embora 60 % dos valores apresentaram assimetria positiva, o restante apresentou assimetria negativa. De acordo com Issaks e Srivastava (1989), o coeficiente de assimetria detecta o grau de afastamento da média em relação à moda e a mediana, sendo este, o coeficiente mais comumente usado para descrever a forma da distribuição da frequência de uma amostragem.

Tabela 2. Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 1.

| Variável (mm) | Média MPa | Variância | DP | CV % | Mínimo MPa | Máximo MPa | Assimetria | Curtose |
|----------------------------|--------------|-----------|------|---------|---------------|---------------|------------|---------|
| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,42 | 0,60 | 0,77 | 54,67 | 0,07 | 4,18 | 1,16 | 2,52 |
| IC 100-200 | 2,73 | 1,05 | 1,03 | 37,54 | 0,84 | 5,89 | 0,92 | 1,67 |
| IC 200-300 | 2,59 | 1,25 | 1,12 | 43,25 | 1,19 | 6,92 | 2,33 | 6,88 |
| IC 300-400 | 2,36 | 1,46 | 1,21 | 51,31 | 1,18 | 6,62 | 1,88 | 3,45 |
| T. água 0-200 (%) | 14,20 | 4,73 | 2,17 | 15,31 | 6,43 | 17,94 | -1,30 | 2,70 |
| T. água 200-400 (%) | 16,93 | 23,29 | 4,83 | 28,51 | 8,20 | 41,93 | 3,36 | 16,31 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,85 | 0,77 | 0,88 | 47,44 | 0,34 | 4,56 | 0,55 | 0,88 |
| IC 100-200 | 2,98 | 1,22 | 1,10 | 37,01 | 0,76 | 6,29 | 0,31 | 0,58 |
| IC 200-300 | 2,37 | 0,64 | 0,80 | 33,87 | 1,10 | 5,26 | 1,63 | 4,13 |
| IC 300-400 | 1,89 | 0,27 | 0,52 | 27,52 | 0,64 | 3,49 | 0,89 | 2,09 |
| T. água 0-200 (%) | 15,47 | 1,21 | 3,17 | 22,02 | 8,07 | 32,57 | 1,88 | 5,26 |
| T. água 200-400 (%) | 17,21 | 1,33 | 1,15 | 21,37 | 3,79 | 34,43 | 3,67 | 1,21 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 4,68 | 6,11 | 2,47 | 52,87 | 0,70 | 12,25 | 0,74 | 0,79 |
| IC 100-200 | 8,99 | 12,68 | 3,56 | 39,60 | 3,25 | 15,75 | 0,35 | -0,94 |
| IC 200-300 | 6,58 | 13,38 | 3,66 | 55,56 | 2,72 | 17,86 | 1,54 | 2,10 |
| IC 300-400 | 4,71 | 6,41 | 2,53 | 53,71 | 2,12 | 15,44 | 2,07 | 5,91 |
| T. água 0-200 (%) | 9,59 | 6,00 | 2,45 | 21,63 | 6,26 | 17,11 | 1,17 | 5,44 |
| T. água 200-400 (%) | 13,02 | 14,94 | 3,87 | 21,04 | 5,64 | 17,65 | 3,70 | 22,10 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,70 | 0,42 | 0,65 | 38,22 | 0,34 | 3,82 | 0,71 | 1,38 |
| IC 100-200 | 2,61 | 1,14 | 1,07 | 40,98 | 0,96 | 5,89 | 1,05 | 1,34 |
| IC 200-300 | 2,32 | 0,67 | 0,82 | 35,23 | 1,20 | 5,18 | 1,49 | 2,33 |
| IC 300-400 | 2,07 | 0,75 | 0,86 | 41,67 | 1,05 | 5,88 | 2,36 | 7,64 |
| T. água 0-200 (%) | 15,92 | 10,49 | 3,24 | 20,34 | 7,14 | 32,85 | 2,43 | 16,89 |
| T. água 200-400 (%) | 17,63 | 5,44 | 2,33 | 13,22 | 8,62 | 21,59 | -1,56 | 4,53 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 2,83 | 1,48 | 1,22 | 42,95 | 0,35 | 5,51 | 0,06 | -0,60 |
| IC 100-200 | 5,44 | 4,93 | 2,22 | 40,79 | 0,66 | 12,36 | 0,67 | 1,57 |
| IC 200-300 | 3,93 | 2,74 | 1,66 | 42,18 | 1,21 | 8,93 | 1,39 | 2,03 |
| IC 300-400 | 2,86 | 1,20 | 1,09 | 38,25 | 1,63 | 8,25 | 3,00 | 12,49 |
| T. água 0-200 (%) | 11,33 | 7,52 | 2,74 | 28,59 | 3,34 | 21,55 | -0,07 | 1,18 |
| T. água 200-400 (%) | 12,45 | 7,75 | 2,78 | 21,38 | 3,32 | 34,31 | -1,40 | 2,42 |

Em relação à curtose dos valores do índice de cone e teor de água, 93 % apresentou distribuição de frequência leptocúrtica, curtose maior que zero (positiva), o que denota a tendência de maior homogeneidade dos dados, com maior concentração em torno da média. Para os atributos que apresentaram distribuição de frequência platicúrtica, com curtose menor que zero (negativa), que apenas foram dois dados do índice de cone, apresentaram maior variabilidade em torno da média.

Igualmente, pode ser observado na Tabela 2 que os maiores valores do índice de cone variaram de 12,25 a 17,86 MPa, os quais foram registrados na época da amostragem 3, nas diferentes profundidades, onde, o máximo índice de cone foi obtido na camada de 200-300 mm, cabe ressaltar que nesta época de amostragem o solo apresentava o menor teor de água. Em contrapartida os valores do índice de cone registrados na amostragem 4 foram menores e os teores de água foram mais elevados.

O coeficiente de variação registrado nesta área, para o índice de cone e teor de água no solo, foram classificados com base nos limites propostos por Warrick e Nielsen (1980). Todos os valores do índice de cone e teor de água, registrados nas diferentes profundidades e épocas de amostragens apresentaram uma variabilidade média do coeficiente de variação, os quais variaram entre 27,52 a 55,56 % para o índice de cone e de 13,22 a 28,59 % para o conteúdo de água, respectivamente. De forma geral verificou-se que os maiores coeficientes de variação registravam-se nas camadas de IC 0-100 mm.

Na Tabela 3, são apresentadas as matrizes de correlações do índice de cone e teor de água no solo para todas as épocas de amostragens. O coeficiente de correlação foi classificado de acordo com o proposto por Kitamura (2004) para o r^2 . Segundo Jakob (1999), as correlações mostram as variáveis que podem ser representadas por outros sem muita perda de informação. Assim, os atributos com correlação maior que 0,9 podem ser representados por apenas um atributo, os outros podem ser desconsiderados sem perda de informação significativa.

De acordo com os limites propostos para o r^2 , verifica-se que a uma das partes dos valores do índice de cone, nas diferentes épocas de amostragens apresentaram uma correlação nula, o que indica baixa variabilidade em função do teor de água analisados, embora se observe correlação baixa (negativa), ou seja, à medida que se aumenta o teor de água no solo há um decréscimo dos valores de índice de cone ou vice versa, nas amostragens 2

ao 5. A maior correlação encontrada foi para um r^2 de 0,58**, obtida na camada de 300-400 mm de profundidade, registrada na amostragem 2.

Tabela 3. Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da Área 1.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| | IC 1 0-100 | IC 1 100-200 | IC 1 200-300 | IC 1 300-400 | T. água 0-200 | T. água 200-400 |
| IC 0-100 | 1 | 0,80 | 0,18 | 0,04 | 0,18 | 0,01 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,52 | 0,30 | 0,20 | -0,02 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,84 | 0,07 | -0,07 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,19 | -0,24 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,16 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,82 | 0,29 | -0,09 | -0,14 | -0,20 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,60 | 0,11 | -0,01 | -0,15 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,42 | -0,31* | -0,21 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,10 | -0,58** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | -0,63 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,60 | 0,28 | 0,03 | -0,01 | 0,03 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,76 | 0,44 | -0,09 | -0,06 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,79 | -0,21 | -0,14 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,28 | -0,14 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,33 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,71 | 0,27 | -0,14 | 0,05 | 0,05 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,65 | 0,02 | 0,05 | 0,09 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,42 | -0,07 | 0,04 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,24 | -0,32* |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,40 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,73 | 0,31 | -0,05 | -0,36 | -0,32* |
| IC 100-200 | | 1 | 0,78 | 0,28 | -0,26 | -0,31* |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,61 | 0,01 | -0,29* |
| IC 300-400 | | | | 1 | 0,28 | -0,19 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,59 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |

** $r > 0,37$ significativo a 1% de probabilidade

* $r > 0,29$ significativo a 5% de probabilidade.

O comportamento espacial dos dados obtidos na Área 1, foram analisados através de semivariogramas apresentada na Tabela 4. A análise mostra que as variáveis estudadas apresentaram, de alguma maneira, dependência espacial, e na sua maioria com efeito pepita alto. Nesses casos, houve uma clara indicação de que estas variáveis têm dependência espacial bastante errática, apresentando distribuição aleatória em espaçamento bastante próximo da distância amostrada, foi uma grade de 10 m.

O efeito pepita, que é um parâmetro importante do semivariograma, reflete um erro analítico indicando uma variabilidade não explicada, que pode ser devido tanto a erros de medidas ou micro variação não detectado em função da distância de amostragem utilizada (CAMBARDELLA, 1994 e PAZ et al., 1996), sendo impossível quantificar a contribuição individual dos erros de medições ou da variabilidade (ARZENO, 1990).

Os parâmetros tabulados da análise geoestatística e dos modelos de semivariograma experimental ajustados para cada uma das profundidades do índice de cone e teor de água no solo, das diferentes épocas de amostragens, podem ser observados na Tabela 4.

Os modelos teóricos que melhor tem-se ajustado aos semivariogramas experimentais do índice de cone e teor de água no solo, para as diferentes épocas de amostragens realizadas, corresponderam ao tipo exponencial. Embora, 50 % dos dados não apresentaram estacionaridade do semivariograma, foram ajustados ao efeito pepita puro.

O grau de dependência espacial das variáveis foi avaliado através da porcentagem do efeito pepita no patamar (C_0/C_0+C_1). Segundo o critério proposto por Cambardella et al. (1994), a dependência espacial para o índice de cone e teor de água nas diferentes amostragens, foi em 36,67 % dos casos moderada. Para os demais dados que apresentaram dependência espacial, esta foi fraca (13,33 %).

O alcance para o índice de cone e teor de água no solo, no geral foram maiores do que a distância entre as amostras (10 m) para todas as amostragens realizadas. O alcance dos 30 semivariogramas teóricos ajustados oscilaram entre 12,40 e 50 m. Pode-se constatar também que os maiores alcances foram registrados nas amostragens 4 e 5, com valores que chegaram a alcançar os 50 m para o índice de cone, assim também, os alcances do teor de água foram elevados, com distâncias que variaram entre 12,40 e 50 m.

Tabela 4. Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 1.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|----------|----------------------|-------------|
| Variável (mm) | Modelo | C₀ | C₁₁ | a | r² | RMSE |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,17 | 0,44 | 40,00 | 0,537 | 0,004 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,00 | 1,16 | 32,31 | 0,314 | 0,010 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,50 | 1,01 | 30,00 | -0,693 | 0,020 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,50 | 1,13 | 30,00 | -0,705 | 0,023 |
| T. água 0-200 | | Efeito pepita puro | | | | |
| T. água 200-400 | Exponencial | 10,00 | 14,95 | 12,40 | 0,019 | 0,420 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 100-200 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 200-300 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 300-400 | Exponencial | 4,00 | 2,31 | 20,00 | -0,549 | 0,075 |
| T. água 0-200 | | Efeito pepita puro | | | | |
| T. água 200-400 | | Efeito pepita puro | | | | |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 100-200 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 200-300 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 300-400 | Exponencial | 3,00 | 3,34 | 20,00 | -0,801 | 0,079 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 2,88 | 4,05 | 40,00 | 0,115 | 0,085 |
| T. água 200-400 | | Efeito pepita puro | | | | |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,02 | 0,45 | 50,00 | 0,588 | 0,007 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,31 | 0,89 | 50,00 | 0,291 | 0,019 |
| IC 200-300 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,00 | 0,85 | 28,28 | 0,635 | 0,012 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 7,54 | 6,61 | 50,00 | 0,313 | 0,241 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 2,08 | 4,80 | 45,57 | 0,793 | 0,059 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 100-200 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 200-300 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 300-400 | | Efeito pepita puro | | | | |
| T. água 0-200 | Exponencial | 4,61 | 4,46 | 50,00 | 0,587 | 0,094 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 0,00 | 9,00 | 23,37 | 0,957 | 0,054 |

Para os parâmetros dos semivariogramas escalonados na Tabela 4, percebe-se que os modelos ajustados estão conforme os critérios de aceitação definidos por Azevedo (2004). Estes critérios são o r^2 do semivariograma ajustado igual ou maior que 0,50 e r^2 significativo na validação cruzada, em nível de 5 % de probabilidade, exceto alguns dados apresentarem certas diferenças com respeito aos valores dos parâmetros da validação cruzada que se concederam ideais ($r^2 = 1$ e $RMSE = 0$).

A partir dos semivariogramas ajustados para o índice de cone nas diferentes épocas de amostragens, foi realizada a interpolação e geração dos mapas pelo método da krigagem ordinária por pontos, para a estimação dos valores não medidos e construção dos mapas temáticos para cada parâmetro que apresentou dependência espacial e patamar determinado, porém quando os dados não apresentavam dependência espacial e com uma baixa correlação, e quando apresentavam dependência, mas com uma validação cruzada demonstrando uma baixa correlação, optou-se por interpolar os dados através do método do inverso da distância.

Para os dados do índice de cone nas amostragens 2 e 3 da superfície até 200-300 mm, amostragem 4 a profundidades de 200-300 mm e a última, a amostragem 5, a todas as profundidades, foi realizada a interpolação dos dados utilizando-se do método do inverso da distância. Para os demais dados, procedeu-se à interpolação efetuada através da krigagem.

Os dados do índice de cone registrados na Área 1, são apresentados nas Figuras 11 a 14. Ao se analisarem, visualmente, cada mapa de isocompactação do solo notou-se que, em todos eles, as áreas com maior ou menor resistência à penetração estavam bem definidas, variando unicamente a intensidade das resistências à penetração mecânica em função da variação do teor de água do solo.

Ao analisar a camada superficial dos valores do índice de cone de 0-100 mm de profundidade (Figura 11), consegue-se perceber um aumento no índice de cone para as 5 épocas de amostragens, com uma média geral de 1,42 a 4,68 MPa, sobretudo visivelmente acentuados na amostragem 3, onde o teor de água foi mais baixo, e pode ver-se uma predominância das faixas da cor verde escuro (4 a 6 MPa), já em proporções menores a faixa da cor verde (2 a 4 MPa) e alguma inserção da faixa da cor marrom claro e marrom (6 a 8 MPa e 8 a 10 MPa, respectivamente).

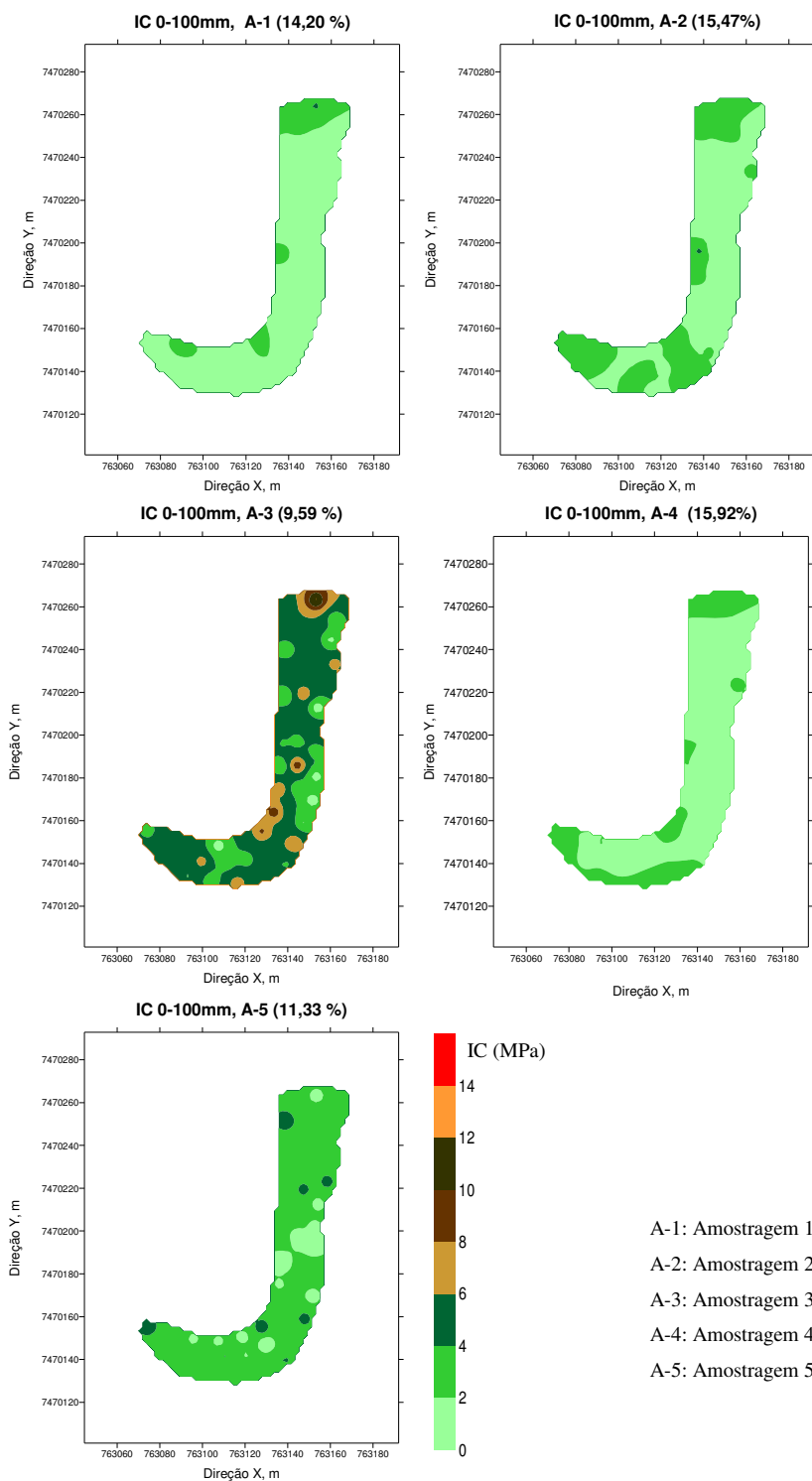
Podemos observar na Figura 12, um comportamento parecido no índice de cone em função do teor de água no solo com o mapa anterior (índice de cone de 0-100 mm de profundidade), principalmente os valores médios do índice de cone obtido na amostragem 3 onde tem-se incrementado notavelmente de 2,61 a 8,98 MPa, com predominância da faixa marrom claro e marrom (6 a 8 MPa e 8 a 10 MPa, respectivamente) e em proporções menores as de cor marrom escuro e laranja (10 a 12 MPa e 12 a 14 MPa).

No caso dos mapas do índice de cone de 300-400 mm de profundidade que se observa na Figura 13, surgem valores de resistência a penetração do solo acentuados já com um índice médio de 2,32 a 6,58 MPa, com uma predominância das faixas de verde (2 a 4 MPa), também alguma inserção da faixa verde escuro e verde claro (4 a 6 MPa e 0 a 2 MPa, respectivamente). Como era de se esperar a amostragem 3, apresentou um comportamento semelhante à registrada na profundidade de IC 100-200 mm (Figura 12), mas com uma redução nos valores do índice de cone, agora com predominância da faixa da cor marrom claro e verde escuro (6 a 8 MPa e 4 a 6 MPa, respectivamente) e em proporções menores as de cor marrom escuro (10 a 12 MPa).

Para a camada mais profunda (Figura 14), nos mapas do índice de cone de 300-400 mm de profundidade, houve acentuada diminuição em comparação aos mapas do índice de cone das Figuras 12 e 13, com um índice médio de 1,89 a 4,71 MPa. Podendo-se observar maior predominância da faixa verde claro e verde (0 a 2 MPa e 2 a 4 MPa, respectivamente). Também nesta amostragem foi registrada uma diminuição das cores verde escuro e marrom claro (4 a 6 MPa e 6 a 8 MPa, respectivamente).

De acordo com Canarache (1990), Merotto e Mundstock (1999) e Silva et al. (2002), os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas acima de 2 MPa indicam uma possibilidade de compactação, limitando o crescimento radicular para a maioria das culturas e que variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada.

Considerando os resultados obtidos nas diversas profundidades amostradas na área estudada, e tendo em conta os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas acima de 2 MPa, evidenciou-se que a mesma apresentou uma camada compactada entre 200 a 400 mm de profundidade.



A-1: Amostragem 1

A-2: Amostragem 2

A-3: Amostragem 3

A-4: Amostragem 4

A-5: Amostragem 5

Figura 11. Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1.

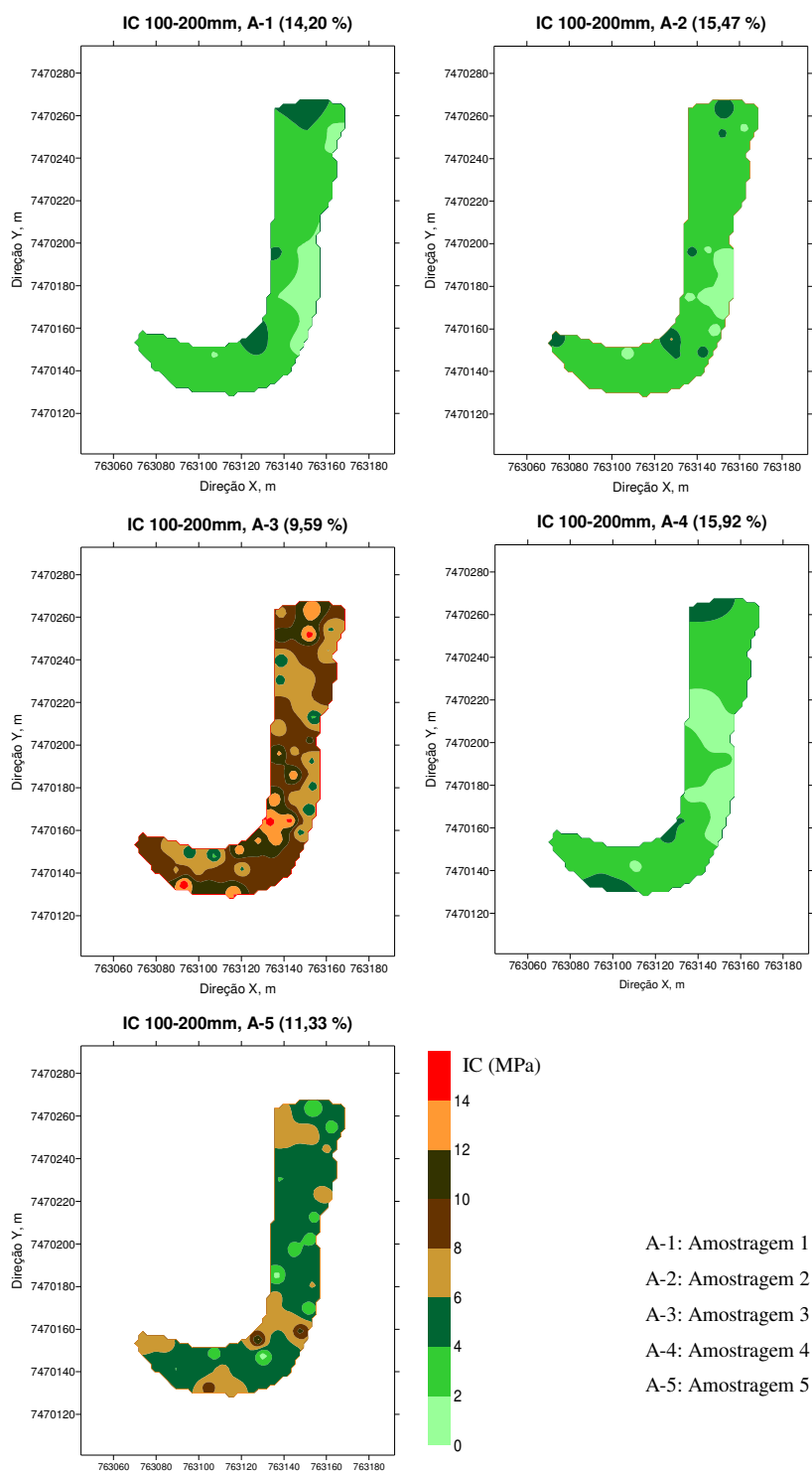


Figura 12. Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1.

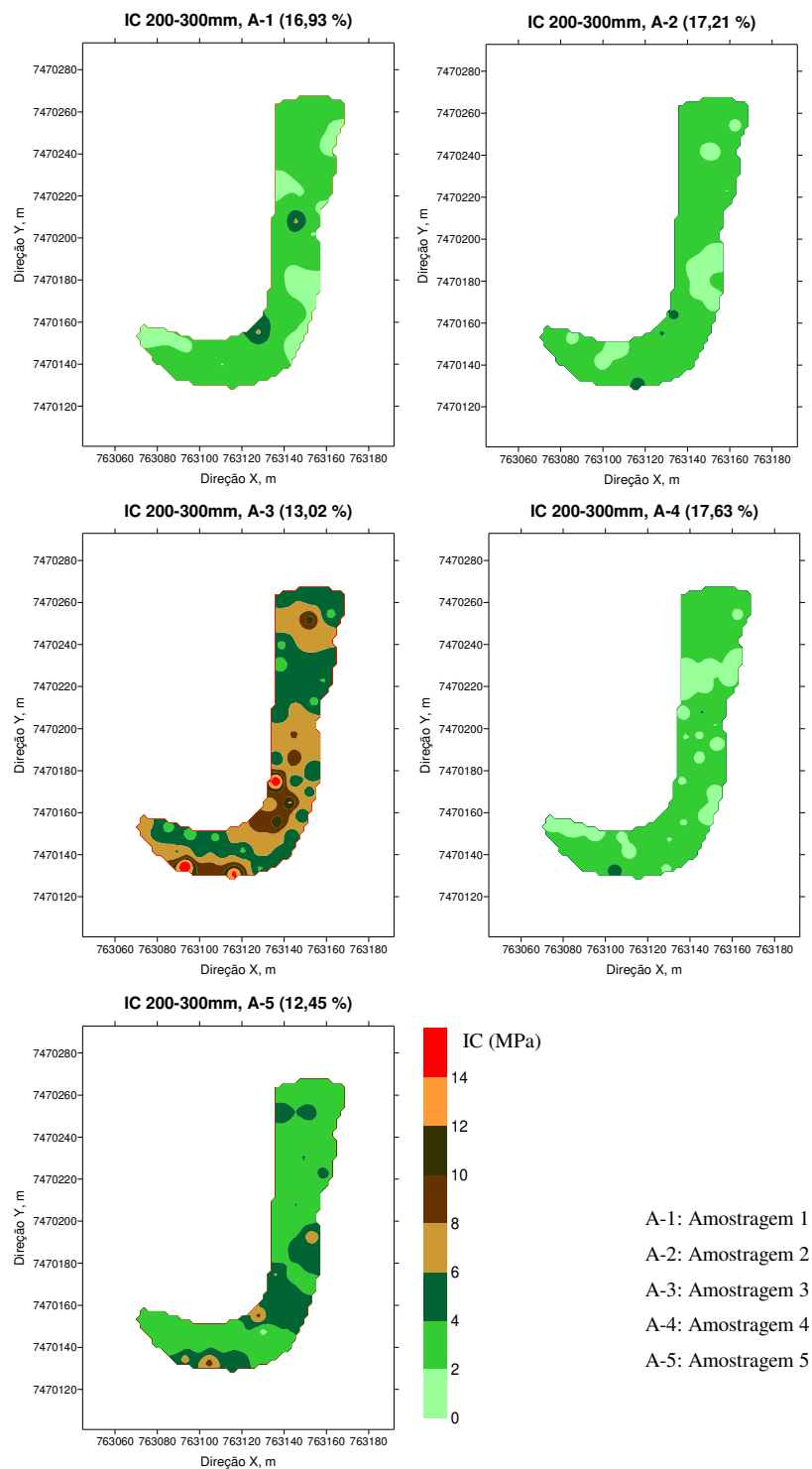


Figura 13. Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1.

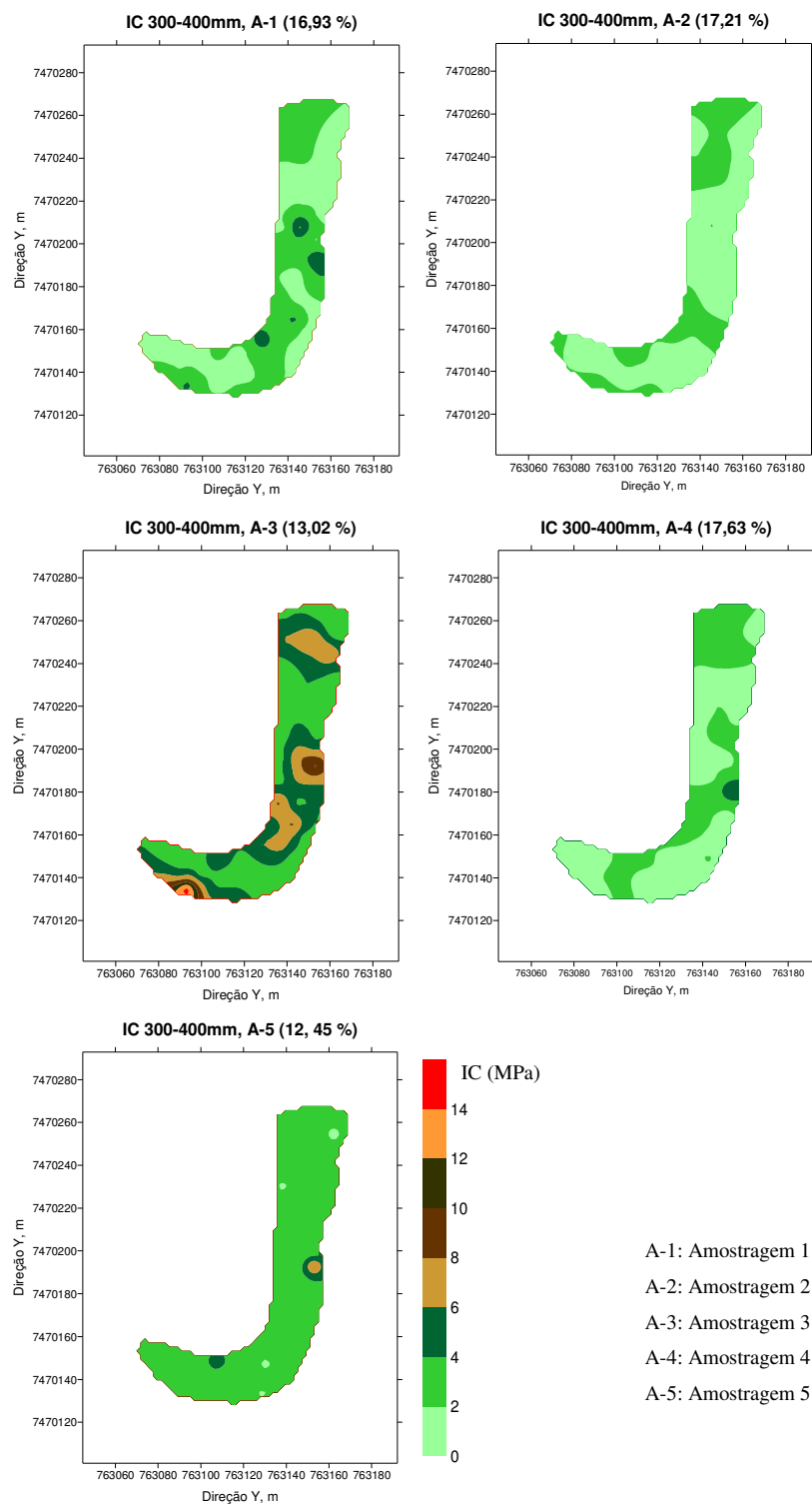


Figura 14. Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 1.

Os resultados das análises físicas de caracterização do solo são apresentados na Tabela 5. Quando analisada a faixa de friabilidade (LP – LC) pode-se observar que ela é reduzida, sobretudo na primeira profundidade, fato que pode representar uma desvantagem com relação à mecanização deste solo.

Os valores de densidade do solo inicial (antes do ensaio de compressão uniaxial) foram bem próximos nas duas profundidades. Com base nos modelos de compressibilidade e nos limites de consistência foi estimada a densidade na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$). Essa densidade representa o valor crítico da relação entre a massa e o volume que o solo pode atingir quando submetidos a carregamentos (tráfegos). Essa é uma proposta prática de se estimar, através da densidade referente à pressão de preconsolidação (σ_p), o quanto de carga o solo ainda pode suportar. Deve-se salientar que este valor é ajustado para quando o solo for trabalhado na faixa friável, e se caso isso não acontecer, esses valores serão significativamente reduzidos. Outro fato é que deve ser evitado que o solo chegue nessa densidade, pois ela representa um ponto de compactação irreversível do solo. Os valores de densidade na pressão de preconsolidação 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, respeitando sempre que possível, a capacidade de suporte do solo de cada solo.

Tabela 5. Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica.

| Profundidade | Limite de Consistência do solo (%) | | | | | Densidade (kg m^{-3}) | | Textura (g kg^{-1}) | | | MO (g kg^{-1}) |
|--------------|------------------------------------|----|----|----|----|----------------------------------|--------------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------|
| | LL | LP | LC | RP | RF | Dsi | $Ds\sigma_p$ | Argila | Silte | Areia | |
| 0-200 mm | 22 | 15 | 14 | 7 | 1 | 1,58 | 1,89 | 125 | 213 | 660 | 2,93 |
| 200-400 mm | 22 | 16 | 14 | 6 | 2 | 1,52 | 1,68 | 187 | 230 | 580 | 2 |

LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), LC (Limite de Contração), RP (Região de Plasticidade), RF (Região de Friabilidade), densidade do solo inicial (D_{si}), densidade referente à pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$) e matéria orgânica (MO).

Essas informações já possibilitam um manejo diferenciado, quando possível, no que se refere aos preparos das áreas, tráfego de máquinas e colheita, principalmente depois de chuvas torrenciais, momento em que o solo certamente estará com teores de água muito elevados no seu perfil.

Na Tabela 6 é apresentado o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões da pressão de preconsolidação ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) para as profundidades de 0-200mm e 200-400mm da área 1, utilizando o procedimento proposto por Snedecor e Cochran (1989).

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade, obtidas para as duas profundidades avaliadas diferenciaram-se estatisticamente. Embora os ajustes tenham sido altamente significativos, os coeficientes de determinações variaram entre 92 e 97 %. Os coeficientes angulares foram negativos e atenderam as prerrogativas do modelo, que preconizam a redução dos valores de pressão de preconsolidação com o aumento do teor de água.

Tabela 6. Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade | Parâmetros do modelo | | | Teste de Snedecor e Cochran |
|--------------|----------------------|---------|----------------|-----------------------------|
| | a | b | R ² | 0-200mm vs 200-400mm |
| 0-200mm | -0,1241 | -1,7232 | 97** | ** |
| 200-400mm | -0,1018 | -2,1366 | 92** | |

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

Pode-se inferir que a pressão de preconsolidação de ambas as profundidades são diferentes e devem ser estimadas por equações diferentes. Esta diferença certamente está associada aos atributos físicos e ao histórico do manejo de cada profundidade, os quais, com o decorrer do tempo e intensidade de uso, específica de cada manejo (tráfego, preparo de solo, tempo de cultivo e etc.), são continuamente alterados. Resultados semelhantes foram encontrados por SILVA et al. (1999), KONDO e DIAS JÚNIOR (1999), MIRANDA (2001) e SILVA (2002).

Os modelos de compressibilidade (modelos de capacidade de suporte de carga), obtidos para as condições desta área, evidenciam esses efeitos. Nas Figuras 15 e 16, observa-se a resistência mecânica do solo das profundidades avaliadas através da pressão de preconsolidação, conforme o proposto por Dias Júnior (1994).

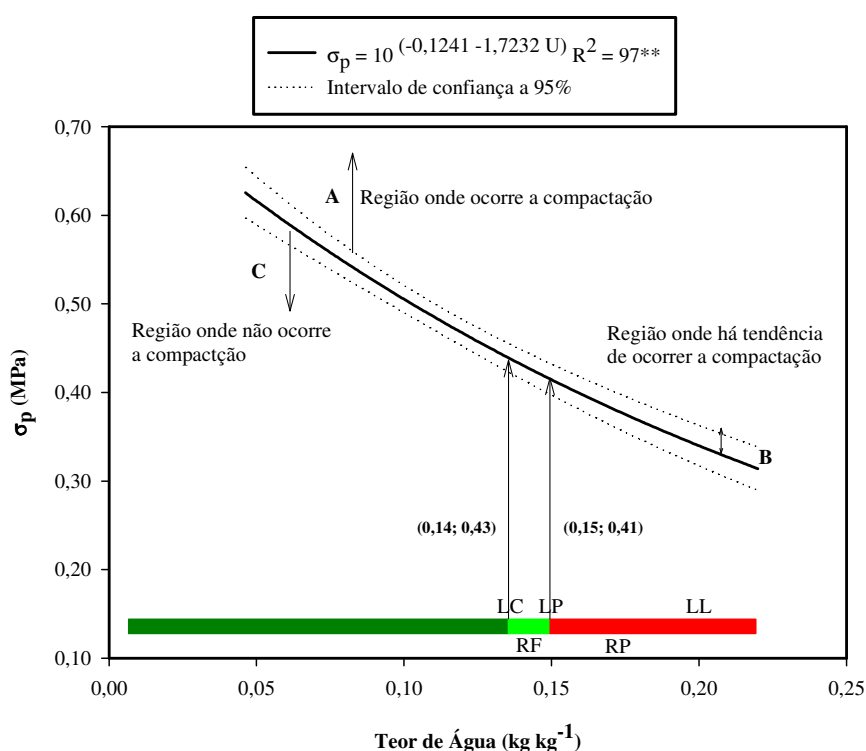


Figura 15. Modelos de compressibilidade da Área 1, na profundidade de 0 a 200mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo.

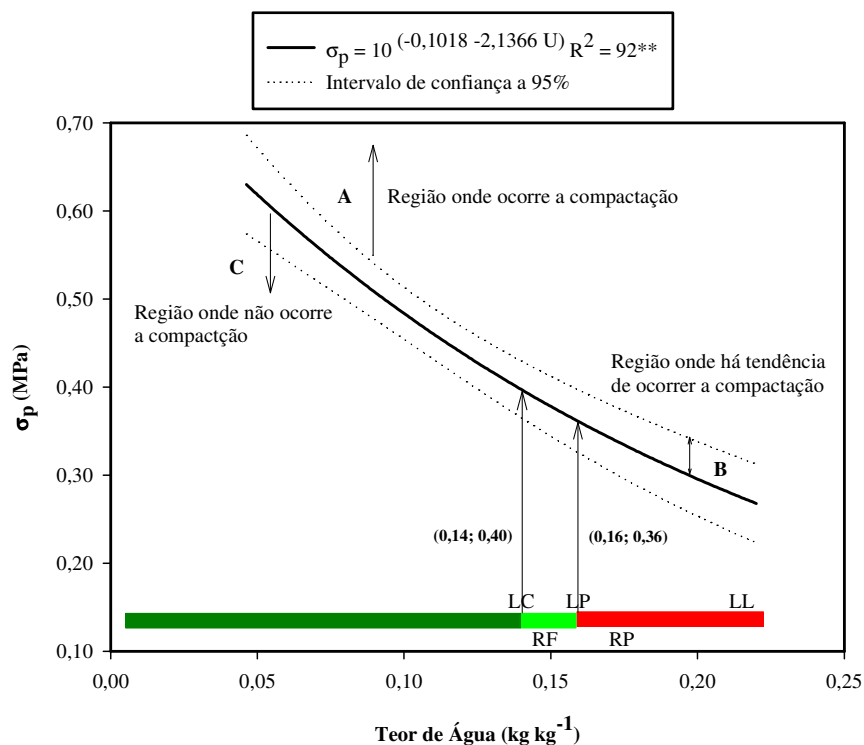


Figura 16. Modelos de compressibilidade da Área 1, na profundidade de 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo

O comportamento dos modelos obtidos evidencia a influência direta da resistência mecânica sobre o manejo da área avaliada através da pressão de pré-consolidação. Nestas figuras observa-se que valores de pressão de pré-consolidação na profundidade de 0-200 mm, foram maiores do que os valores da profundidade 200-400 mm, especificamente na presença de teores mais elevados de água.

Os maiores valores de pressão de pré-consolidação observados nas duas profundidades, se associados aos estados de consistência desses solos (LL, LP e LC), sugerem que, para o próximo preparo, especificamente nessa área, a estimativa das cargas a serem aplicadas deve ter como referência a pressão de pré-consolidação, caso contrário esta camada

estará sujeita a sofrer compactação adicional e não-recuperável por apresentar menor capacidade de suporte de carga (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1999).

Além disso, a decisão do momento ideal do preparo, considerando a região de friabilidade (RF), deve ser repensada, pois, como mostra as Figuras 15 e 16, além das diferenças na pressão de preconsolidação entre profundidades, percebe-se uma variação nos estados de consistência, principalmente na região de friabilidade, considerada, por HILLEL (1982), como a região indicadora do momento adequado para o preparo. Esses resultados, portanto, denotam a necessidade de se identificar o conteúdo de água dentro da região de friabilidade que, de fato, possa ser representativa para que, mediante os modelos de compressibilidade, a pressão de preconsolidação do solo seja criteriosamente estimada.

Para avaliar a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração medida através do índice de cone, foi preciso relacionar a pressão de preconsolidação com o índice de cone, através da equação $\sigma_p = a + b$ (IC), para todas as camadas de índice de cone analisadas. Em seguida, o procedimento proposto por Snedecor e Cochran (1989) foi utilizado para comparar as equações obtidas nas diferentes profundidades analisadas na Área 1, e podem ser observadas na Tabela 7, onde está apresentado o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões.

As profundidades IC 0-100mm e IC 100-200mm diferiram estatisticamente das equações obtidas para as profundidades IC 200-300mm e IC 300-400mm, e entre elas não foram observadas diferença estatística. Certificada a não-significância entre as equações registradas nas camadas mais profundas, juntaram-se os valores do teor de água e de pressão de preconsolidação e novas equações foram ajustadas e novamente testadas com as demais camadas. Assim, observa-se que a equação para IC 200-300mm + IC 300-400mm diferiram das outras equações, como pode ser verificado na Tabela 7, depois de recalculado os valores de F.

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f$ (IC) na identificação da compactação do solo, as pressões de preconsolidação para as profundidades de IC 0-100mm e IC 100-200mm, foram estimadas por meio da equação $\sigma_p = 0,1151 + 0,1043(IC)$ e $\sigma_p = 0,0656 + 0,0414(IC)$ respectivamente. Já no caso das profundidades de IC 200-300mm e IC 300-400mm, resultou na obtenção de uma única equação para duas profundidade de índice de cone, que foi $\sigma_p = -0,6280 + 0,2233(IC)$, pois estes não apresentaram diferença significativa.

Portanto, a Área 1 nas profundidades estudadas apresentaram equações distintas para estimar a pressão de preconsolidação em função do índice de cone.

Tabela 7. Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade (mm) | Teste de Snedecor e Cochran |
|---|-----------------------------|
| | F |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,1151 + 0,1043$ (IC) $R^2 = 83^{**}$ vs. IC 100-200 : $\sigma_p = 0,0656 + 0,0414$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ | ** |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,1151 + 0,1043$ (IC) $R^2 = 83^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,1431 + 0,1429$ (IC) $R^2 = 86^{**}$ | ** |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,1151 + 0,1043$ (IC) $R^2 = 83^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 0,0815 + 0,1295$ (IC) $R^2 = 92^{**}$ | ** |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,0656 + 0,0414$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,1431 + 0,1429$ (IC) $R^2 = 86^{**}$ | ** |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,0656 + 0,0414$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 0,0815 + 0,1295$ (IC) $R^2 = 92^{**}$ | ** |
| IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,1431 + 0,1429$ (IC) $R^2 = 86^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 0,0815 + 0,1295$ (IC) $R^2 = 92^{**}$ | Ns |
| <u>Recalculando o F para os modelos que não diferiram estatisticamente</u> | |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,1151 + 0,1043$ (IC) $R^2 = 83^{**}$ vs. IC 200-300 + IC 300-400 : $\sigma_p = -0,6280 + 0,2233$ (IC) $R^2 = 90^{**}$ | ** |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,0656 + 0,0414$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ vs. IC 200-300 + IC 300-400 : $\sigma_p = -0,6280 + 0,2233$ (IC) $R^2 = 90^{**}$ | ** |

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

Portanto, na agricultura, a aplicação de pressões maiores do que a maior pressão suportada pelo solo deve ser evitada, para que não ocorra a compactação adicional do solo (GUPTA et al., 1989; LEBERT e HORN, 1991; IMHOFF et al., 2001), e por constituir a pressão de preconsolidação um indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (DIAS JUNIOR, 1994).

As Figuras 15 e 16 foram divididas em três regiões visando identificar a compactação do solo por meio da pressão de preconsolidação estimada. As regiões consideradas foram: (A) uma região onde as pressões de preconsolidação são maiores do que as pressões de preconsolidação estimadas com a equação do intervalo de confiança a 95 %, considerada como sendo a região onde ocorre a compactação; (B) uma região onde as pressões de preconsolidação são menores do que as pressões de preconsolidação estimadas com a equação do intervalo de confiança a 95 % e maiores do que as pressões estimadas com a equação $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$, sendo considerada a região onde há tendência em ocorrer a compactação do solo, e (C) uma região onde as pressões de preconsolidação são menores do que a pressão de preconsolidação estimada com a equação $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$, sendo considerada como a região onde não ocorre a compactação do solo.

Nestas figuras (15 e 16) estão apresentados os modelos de capacidade de suporte de carga, onde podem-se observar as três regiões consideradas. A partir do comportamento da equação ajustada a estes modelos é possível identificar através da pressão de preconsolidação estimada por meio da equação $\sigma_p = a + b$ (IC), que camada, grade ou solo esteve mais consolidado, ou seja, 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.

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f$ (IC) na identificação da compactação do solo, foram selecionados os valores do índice de cone obtidos na profundidade de IC 100-200mm com um teor de água médio de 9,59 % e 15,92 % (amostragens 3 e 4 respectivamente).

Foram selecionados de forma aleatória dois pontos (Z_1 e Z_2) com coordenadas geográficas conhecidas, correspondentes à época da amostragem 3 e, igualmente esses mesmos pontos já selecionados, correspondentes à época da amostragem 4. A pressão de

preconsolidação foi estimada por meio da equação $\sigma_p = 0,0656 + 0,0414(IC)$, plotado na Figura 17. Nesta, observa-se que a pressão de preconsolidação determinada no ponto Z_1 da amostragem 3 localiza-se na região onde ocorre a compactação do solo, enquanto que o mesmo ponto (Z_1) obtido na amostragem 4, situa-se na região em que não ocorre compactação do solo, embora esteja localizado no limite da região de friabilidade (RF) e a região de plasticidade (RP).

Já no ponto Z_2 obtido na amostragem 3, localizado na região onde ocorre a compactação do solo, que igual ao ponto Z_2 registrado na amostragem 4, o solo encontra-se totalmente na região de contração (LC), onde apresenta a maior capacidade de sustentação e qualquer tráfego não compromete a sua estrutura.

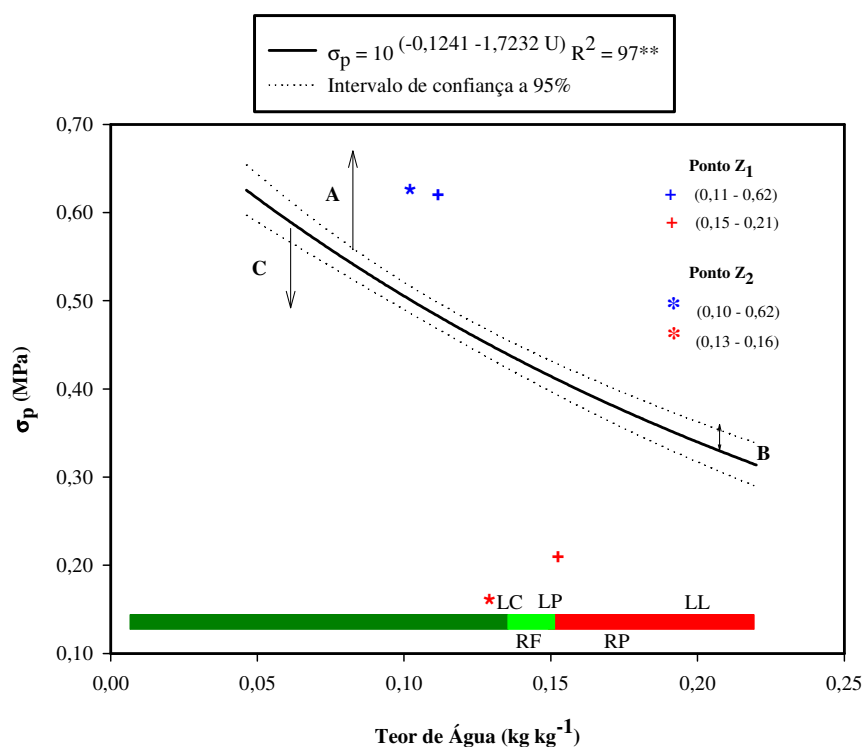


Figura 17. Modelos de compressibilidade da Área 1, na profundidade de 0 a 200mm, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo.

6.2 Área 2

A Tabela 8 ilustra os momentos estatísticos dos valores do índice de cone e teor de água nas diferentes amostragens realizadas. Assim, constatou-se que alguns destes dados afastavam-se da curva de distribuição normal e diminuía a aproximação do conjunto a ela. Estes dados que apresentavam uma distribuição não normal foram os valores do índice de cone na amostragem 1, nas duas primeiras profundidades analisadas.

Pode-se observar que a grande maioria dos valores do índice de cone nas diferentes épocas de amostragem apresentaram uma assimetria positiva e somente 2 profundidades apresentaram assimetria negativa. Nos valores de teor de água, 60 % destes apresentaram assimetria negativa e a restante assimetria positiva.

Com relação à curtose dos valores do índice de cone e teor de água no solo, 70 % apresentou uma distribuição de frequência leptocúrtica. Para os valores que apresentaram distribuição de frequência platicúrtica, que neste caso foi a grande maioria dos valores de teor de água.

Igualmente, na Tabela 8 observa-se que os maiores valores do índice de cone variaram de 5,72 a 15,12 MPa, os quais foram registrados na amostragem 2, nas diferentes profundidades, onde, o máximo índice de cone foi obtido na camada de 300-400 mm, mas cabe ressaltar que na época da amostragem o solo apresentava o menor teor de água do período considerado. Em contrapartida os valores do índice de cone registrados na amostragem 4 foram menores e os teores de água foram mais elevados.

O coeficiente de variação, para todos os valores do índice de cone apresentaram uma variabilidade média do coeficiente de variação, os quais variaram entre 27,66 a 98,40 %, embora o coeficiente de variação obtido nas duas primeiras camadas das amostragens 1 e 5 apresentaram uma variabilidade alta. Para o teor de água a variabilidade do coeficiente de variação foi média, variando de 26,79 a 56,12 %.

Tabela 8. Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 2.

| Variável (mm) | Média MPa | Variância | DP | CV % | Mínimo MPa | Máximo MPa | Assimetria | Curtose |
|----------------------------|--------------|-----------|-------|---------|---------------|---------------|------------|---------|
| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 0,30 | 0,13 | 0,36 | 98,40 | 0,04 | 2,39 | 3,39 | 15,90 |
| IC 100-200 | 1,03 | 0,58 | 0,76 | 73,93 | 0,10 | 4,11 | 1,87 | 4,89 |
| IC 200-300 | 2,65 | 1,84 | 1,36 | 51,10 | 0,30 | 7,21 | 1,00 | 1,21 |
| IC 300-400 | 4,13 | 3,61 | 1,90 | 46,07 | 0,93 | 10,60 | 0,95 | 0,93 |
| T. água 0-200 (%) | 15,30 | 44,84 | 6,70 | 43,76 | 3,32 | 41,37 | 1,05 | 2,10 |
| T. água 200-400 (%) | 15,30 | 53,10 | 7,29 | 47,61 | 3,62 | 37,60 | 0,62 | 0,05 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,90 | 1,70 | 1,31 | 68,59 | 0,16 | 5,72 | 0,73 | 0,08 |
| IC 100-200 | 4,62 | 5,19 | 2,28 | 49,30 | 0,74 | 11,96 | 0,86 | 1,18 |
| IC 200-300 | 5,42 | 6,77 | 2,60 | 48,02 | 1,26 | 12,96 | 1,08 | 0,88 |
| IC 300-400 | 5,65 | 9,77 | 3,13 | 55,28 | 1,17 | 15,12 | 1,35 | 1,75 |
| T. água 0-200 (%) | 13,64 | 34,23 | 5,85 | 42,89 | 3,64 | 26,16 | 0,26 | -0,67 |
| T. água 200-400 (%) | 15,14 | 37,21 | 6,10 | 40,28 | 3,53 | 27,99 | 0,28 | -0,55 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,16 | 0,11 | 0,32 | 27,90 | 0,58 | 2,03 | 0,44 | -0,08 |
| IC 100-200 | 1,31 | 0,15 | 0,38 | 29,38 | 0,61 | 2,24 | 0,46 | -0,44 |
| IC 200-300 | 1,90 | 0,51 | 0,71 | 37,58 | 0,76 | 4,37 | 1,07 | 0,83 |
| IC 300-400 | 3,11 | 1,88 | 1,37 | 44,02 | 1,02 | 7,80 | 0,78 | 0,63 |
| T. água 0-200 (%) | 18,77 | 58,11 | 7,62 | 40,60 | 6,03 | 50,31 | 1,24 | 2,41 |
| T. água 200-400 (%) | 22,25 | 24,55 | 15,67 | 56,12 | 7,09 | 65,33 | 0,63 | -0,73 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 0,59 | 0,06 | 0,24 | 39,89 | 0,17 | 1,06 | 0,00 | -0,76 |
| IC 100-200 | 1,10 | 0,09 | 0,30 | 27,66 | 0,49 | 1,90 | 0,52 | 0,19 |
| IC 200-300 | 1,48 | 0,28 | 0,53 | 35,97 | 0,55 | 3,02 | 0,68 | 0,69 |
| IC 300-400 | 2,21 | 0,94 | 0,97 | 43,88 | 0,86 | 4,81 | 0,90 | 0,08 |
| T. água 0-200 (%) | 20,43 | 29,95 | 5,47 | 26,79 | 6,37 | 34,05 | 0,01 | -0,19 |
| T. água 200-400 (%) | 27,92 | 54,94 | 7,41 | 33,31 | 9,71 | 50,89 | 0,74 | 1,67 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,33 | 0,82 | 0,91 | 68,32 | 0,11 | 4,26 | 0,93 | 0,77 |
| IC 100-200 | 2,33 | 1,15 | 1,07 | 45,95 | 0,27 | 5,97 | 0,73 | 0,87 |
| IC 200-300 | 2,32 | 0,78 | 0,88 | 38,13 | 0,63 | 5,16 | 0,88 | 1,29 |
| IC 300-400 | 2,78 | 0,94 | 0,97 | 34,90 | 0,56 | 5,63 | 0,66 | 0,62 |
| T. água 0-200 (%) | 16,99 | 31,56 | 5,62 | 33,06 | 3,54 | 28,38 | 0,17 | -0,51 |
| T. água 200-400 (%) | 17,19 | 49,54 | 7,04 | 40,94 | 2,54 | 32,95 | 0,19 | -0,43 |

As matrizes de correlação do índice de cone e teor de água no solo para as diferentes épocas de amostragens são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da área 2.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|---------------------|----------|------------|------------|------------|---------------|-----------------|
| Variável (mm) | IC 0-100 | IC 100-200 | IC 200-300 | IC 300-400 | T. água 0-200 | T. água 200-400 |
| IC 0-100 | 1 | 0,77 | 0,40 | 0,42 | -0,17 | -0,24* |
| IC 100-200 | | 1 | 0,61 | 0,41 | -0,16 | -0,25* |
| IC 200-300 | | | | 0,69 | -0,21 | -0,35** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,34* | -0,50** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,72 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,67 | 0,26 | 0,17 | 0,08 | 0,14 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,73 | 0,42 | -0,13 | -0,07 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,79 | -0,43** | -0,44** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,53** | -0,58** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,80 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,31 | 0,09 | -0,09 | 0,07 | -0,04 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,48 | 0,17 | 0,02 | 0,07 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,62 | -0,36** | 0,53** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,41** | 0,51** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | -0,62 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,44 | 0,06 | -0,02 | 0,08 | -0,03 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,52 | 0,20 | -0,25** | -0,18 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,64 | -0,35** | -0,39** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,45** | -0,47** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,72 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,76 | 0,31 | -0,02 | -0,20 | -0,10 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,63 | 0,22 | -0,26** | -0,13 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,68 | -0,40** | -0,33** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,27* | -0,53** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,39 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |

** $r > 0,28$ significativo a 1% de probabilidade

* $r > 0,22$ significativo a 5% de probabilidade.

De acordo com os limites propostos para r^2 , pode-se verificar na Tabela 9 que a grande maioria dos dados obtidos nas profundidades do índice de cone de 100-200 ao 300-400 mm nas diferentes amostragens, apresentaram uma correlação significativa baixa a moderada, todas negativas, ou seja, à medida que se aumenta o teor de água no solo houve um decréscimo dos valores do índice de cone ou vice versa. A maior correlação encontrada foi para um r^2 de 0,58**, obtida na camada 300-400 mm na amostragem 2.

A análise espacial dos dados do índice de cone e teor de água no solo para as diferentes épocas de amostragens da Área 2, foram analisados utilizando-se os semivariogramas experimentais. Os parâmetros tabulados da análise geostatística e os modelos de semivariograma experimental ajustados para cada uma das profundidades do índice de cone e teor de água no solo, das diferentes épocas de amostragens, podem ser observados na Tabela 10.

O modelo teórico que melhor tem-se ajustado ao semivariograma dos índices de cone e teor de água, obtidos nas diferentes profundidades e épocas de amostragens, correspondeu ao tipo exponencial, que ajustou-se a 56,66 % dos dados, seguido do gaussiano com uma porcentagem de 26,66 % e, com menor representatividade, o modelo esférico que representou 6,66 % dos dados analisados.

Para os valores que não apresentaram estacionaridade do semivariograma, optou-se por modelar os resíduos. Após tentativas não bem sucedidas de ajustes dos resíduos, voltou-se a trabalhar com os dados originais, sendo, portanto, ajustados ao modelo efeito pepita puro que corresponde a 6,66 % dos dados, e neste caso indicou falta de dependência espacial para distâncias maiores que a menor distância de amostragem adotada (10 m), demonstrando assim, que os dados têm uma distribuição aleatória. As camadas que apresentavam falta de dependência espacial foram as profundidade de 0-100 e 100-200 mm das amostragens 4 e 5, respectivamente.

O grau de dependência espacial para o índice de cone e teor de água nas diferentes épocas de amostragens foi forte em 53,33 % dos casos. Para os demais dados que apresentaram dependência espacial, esta porcentagem foi de moderada (33,33 %) para fraco (6,67 %).

Tabela 10. Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 2.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|-------------|
| Variável (mm) | Modelo | C₀ | C₁ | a | r² | RMSE |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,00 | 0,12 | 40,00 | -1,234 | 0,004 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,26 | 0,32 | 52,27 | -0,422 | 0,013 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,81 | 1,01 | 50,57 | 0,228 | 0,029 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,34 | 3,57 | 60,00 | -0,796 | 0,180 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,00 | 53,86 | 80,00 | -0,138 | 3,271 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 0,00 | 66,78 | 60,00 | 0,820 | 4,958 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 1,35 | 0,37 | 90,00 | 0,923 | 0,031 |
| IC 100-200 | Exponencial | 2,22 | 2,65 | 31,70 | 0,891 | 0,043 |
| IC 200-300 | Exponencial | 2,77 | 4,60 | 90,00 | -0,893 | 0,140 |
| IC 300-400 | Gaussiano | 2,78 | 10,32 | 90,00 | 0,917 | 0,375 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,00 | 11,31 | 27,33 | 0,963 | 0,131 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 0,00 | 47,00 | 60,00 | 0,894 | 2,450 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,06 | 0,05 | 61,38 | 0,78 | 0,00 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,00 | 0,15 | 31,70 | 0,75 | 0,00 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,24 | 0,29 | 90,00 | -0,89 | 0,02 |
| IC 300-400 | Gaussiano | 0,83 | 1,81 | 90,00 | 0,88 | 0,06 |
| T. água 0-200 | Gaussiano | 13,96 | 69,12 | 90,00 | 0,86 | 3,92 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 44,40 | 273,34 | 70,00 | 0,89 | 13,42 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,01 | 0,09 | 16,62 | 0,174 | 0,005 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,23 | 0,04 | 50,00 | 0,396 | 0,008 |
| IC 300-400 | Esférico | 0,28 | 0,81 | 80,00 | 0,889 | 0,032 |
| T. água 0-200 | Gaussiano | 0,87 | 38,04 | 70,00 | 0,779 | 2,787 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 14,97 | 55,77 | 70,00 | 0,911 | 2,480 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,41 | 0,40 | 20,83 | 0,156 | 0,018 |
| IC 100-200 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,00 | 0,75 | 16,94 | 0,267 | 0,018 |
| IC 300-400 | Esférico | 0,19 | 0,92 | 80,00 | 0,867 | 0,043 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 7,56 | 29,09 | 80,00 | 0,860 | 1,071 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 16,75 | 42,87 | 60,00 | 0,713 | 2,812 |

No que diz respeito aos parâmetros de alcance para o índice de cone de forma geral, foram maiores do que a distância entre as amostras (10 m) para todas as amostragens realizadas. O alcance dos 20 semivariogramas teóricos ajustados oscilaram entre 16,62 m e 90 m. Pode-se constatar assim, que os maiores alcances foram registrados nas amostragens 2 e 3. No caso dos teores de água no solo, os alcances apresentaram uma variação de 27,33 a 90 m.

Dos parâmetros de validação cruzada consignados na Tabela 10 deduz-se que os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais parecem adequados, embora apresentassem certas diferenças com respeito aos valores dos parâmetros da validação cruzada que se concederam ideais.

A partir dos semivariogramas ajustados para o índice de cone nas diferentes épocas de amostragens, foi realizada a interpolação e geração dos mapas pelo método da krigagem ordinária por pontos, para a estimação dos valores não medidos e construção dos mapas temáticos para cada parâmetro que apresentou dependência espacial e patamar determinado.

Quando os dados não apresentavam dependência espacial e uma baixa correlação, e quando apresentavam dependência, mas, com uma validação cruzada demonstrando uma baixa correlação, optou-se por interpolar os dados através do método do inverso da distância, que no caso foram os dados do índice de cone registrados nas amostragens 4 e 5 das camadas de 0-100 mm e de 100-200 mm, respectivamente. Para os demais dados, procedeu-se à interpolação efetuada através da krigagem.

Ao se analisarem, visualmente, cada mapa de isocompactação do solo representadas nas Figuras 18 a 21, notou-se que, em todos eles, as áreas com maior ou menor resistência à penetração estavam bem definidas, variando unicamente a intensidade das resistências em função do conteúdo de água no solo.

Ao analisar a camada superficial dos valores do índice de cone de 0-100 mm de profundidade (Figura 18), pode ver-se uma predominância das faixas da cor verde claro (0 a 2 MPa) nas amostragens 1, 3 e 4, mas consegue-se perceber um aumento no índice de cone para a amostragem 2 onde o teor de água foi mais baixo, com alguma inserção da faixa da cor verde (2 a 4 MPa), em proporções bem menores na faixa da cor verde escuro (4 a 6 MPa). A amostragem 5 também apresentou umas inserções da cor verde.

Podemos observar na Figura 19, um comportamento parecido no índice de cone em função do teor de água no solo com o mapa anterior (índice de cone de 0-100 mm de profundidade), principalmente os valores médios do índice de cone obtido na amostragem 2 onde tem-se uma variação de 1,03 a 4,62 MPa, com predominância da faixa da cor verde e verde escuro (2 a 4 MPa e 4 a 6 MPa, respectivamente) e em proporções menores as de cor marrom claro e marrom (6 a 8 MPa e 8 a 10 MPa), como também uma pequena faixa da cor marrom escuro.

Para os mapas do índice de cone de 200-300 mm de profundidade que se observa na Figura 20, surgem valores de resistência a penetração do solo mais acentuados na amostragem 2, com predominância das faixas da cor verde, verde escuro, marrom claro e escuro. As amostragens 1, 3 e 5 apresentaram aumento nos valores do índice de cone quando comparado com as anteriores profundidades.

Da mesma forma, ao serem analisados os mapas da Figura 21, consegue-se perceber um aumento no índice de cone, de uma média geral de 2,21 a 5,65 MPa, para as 5 diferentes épocas da amostragem, na medida em que o solo apresentou diminuição no conteúdo de água. Além disso, como era de esperar-se a amostragem 2, apresentou um comportamento semelhante à registrada na profundidade de IC 100-200 mm nos mapas das Figura 19 e 20, mas com aumento nos valores do índice de cone, agora com predominância da faixa da cor marrom claro, verde e verde escuro, como também inserções das cores laranja e vermelho.

Por meio da mensuração do índice de cone na área 2, verificou-se que a variabilidade espacial da compactação apresentou diferentes intensidades em função do conteúdo de água no solo. Essa variabilidade também existe em profundidades, existe uma camada compactada entre 200 e 400 mm de profundidade máxima, com base nos níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas (2 MPa).

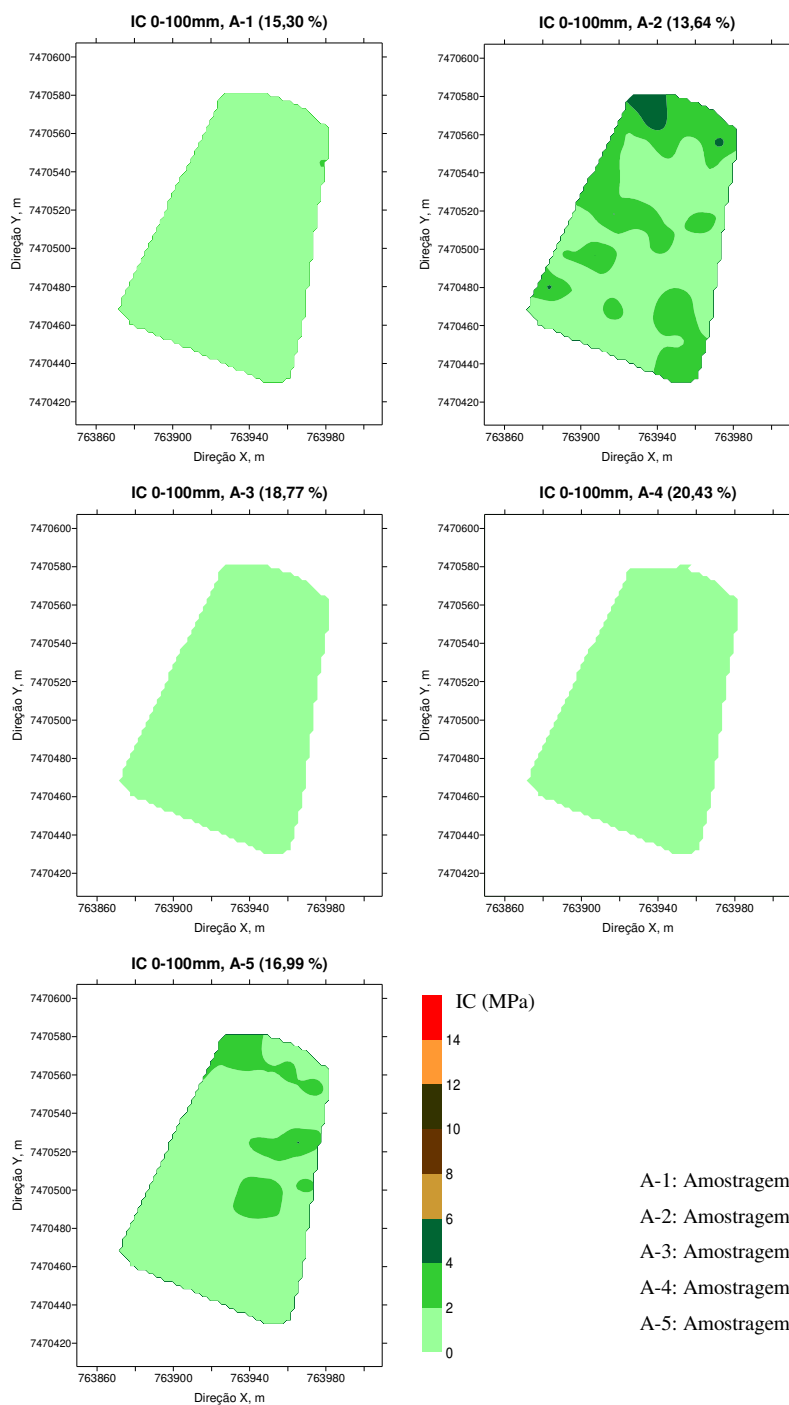


Figura 18. Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2.

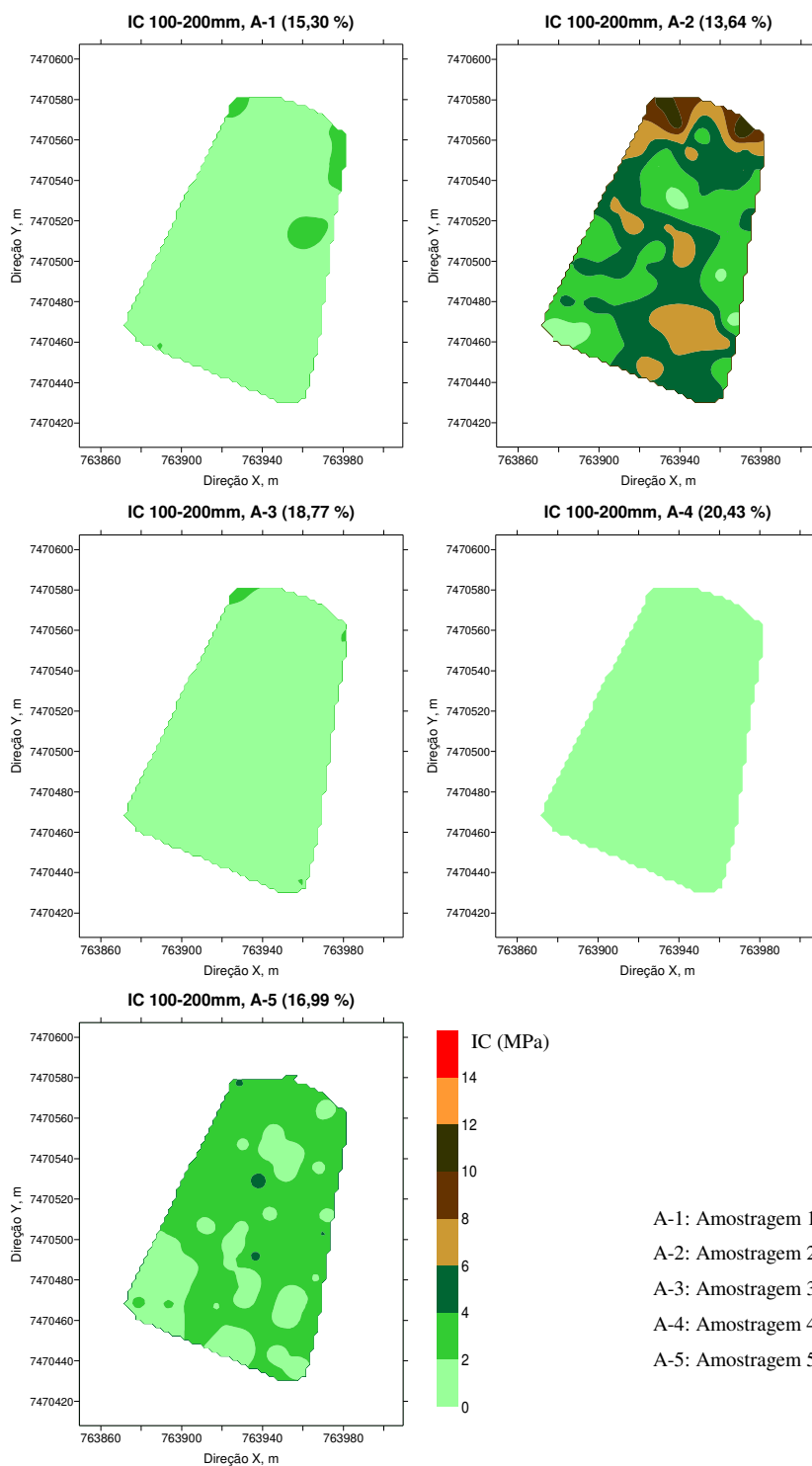


Figura 19. Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2.

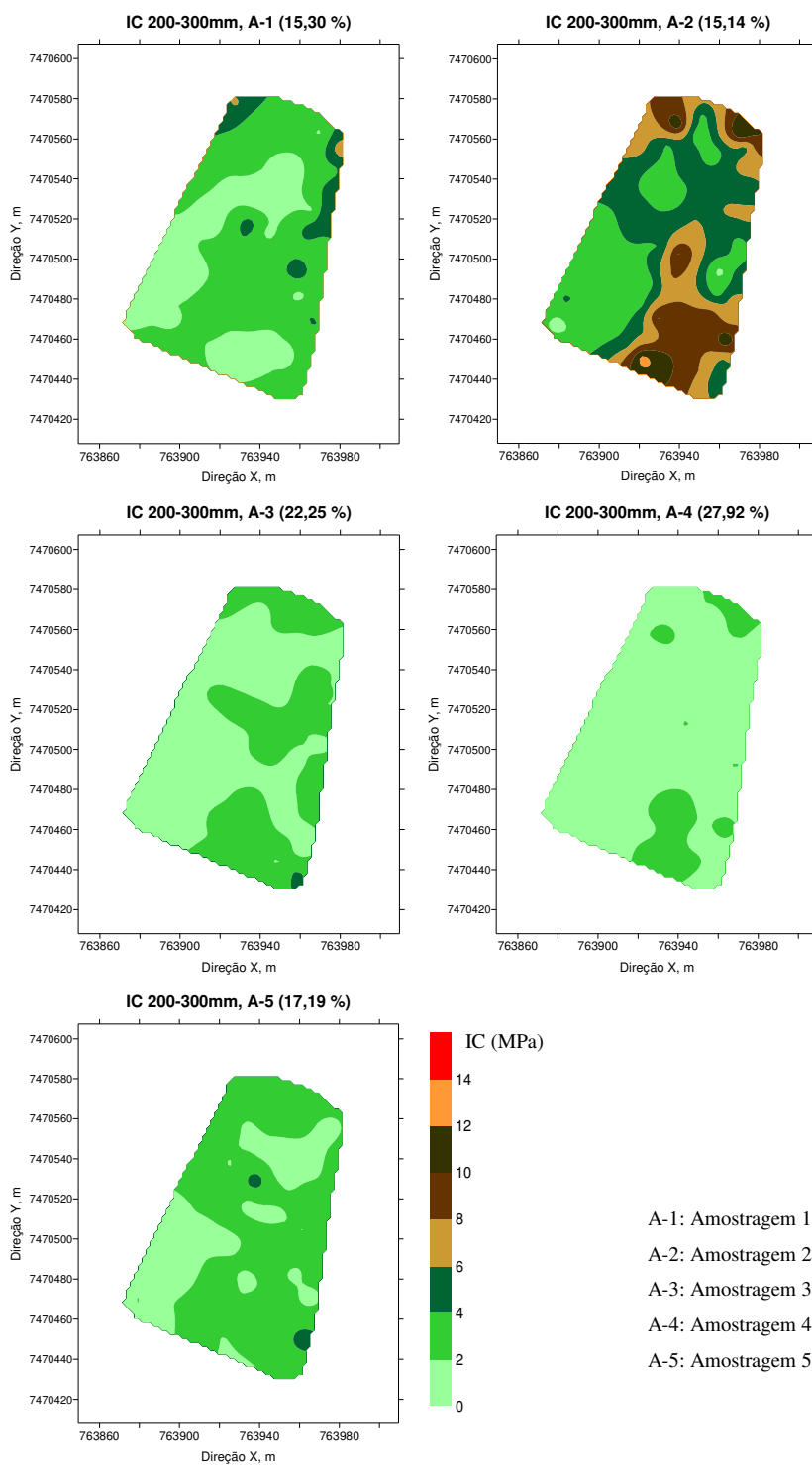


Figura 20. Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2.

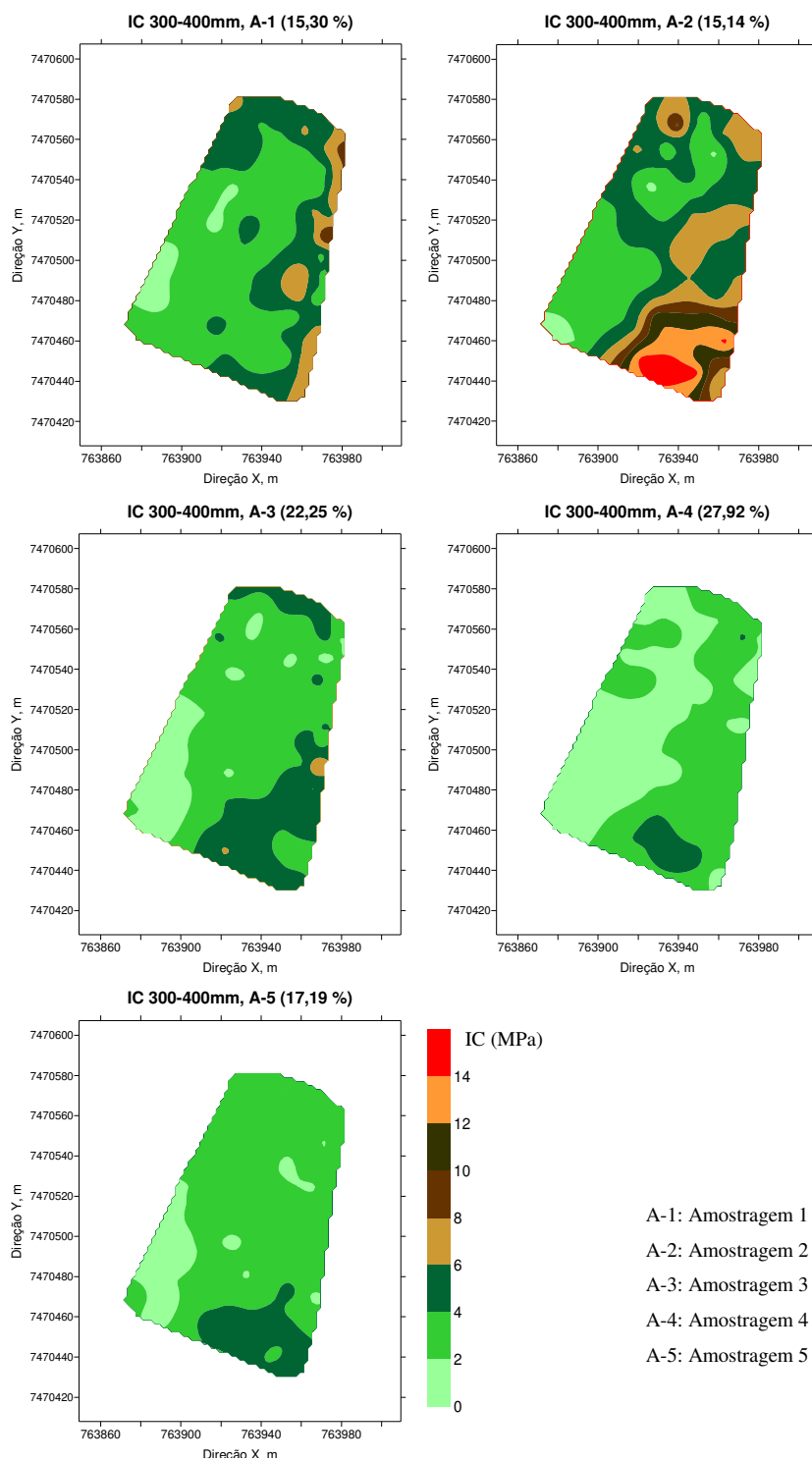


Figura 21. Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 2.

Os resultados das análises físicas de caracterização do solo são apresentados na Tabela 11. Quando analisada a faixa de friabilidade (LP – LC) pode-se observar que ela é reduzida, sobretudo na segunda profundidade, fato que pode representar uma desvantagem com relação à mecanização deste solo.

Os valores de densidade do solo inicial foram semelhantes nas duas profundidades. Com base nos modelos de compressibilidade e nos limites de consistência foi estimada a densidade na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), onde as duas profundidades apresentaram valores semelhante. Essas informações possibilitam um manejo diferenciado da área, no que refere-se ao preparo das áreas ou tráfego de máquinas.

Tabela 11. Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica.

| Profundidade | Limite de Consistência do solo (%) | | | | | Densidade (kg m^{-3}) | | Textura (g kg^{-1}) | | | MO (g kg^{-1}) |
|-------------------|------------------------------------|----|----|----|----|----------------------------------|--------------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------|
| | LL | LP | LC | RP | RF | Dsi | $Ds\sigma_p$ | Argila | Silte | Areia | |
| 0-200 mm | 22 | 15 | 13 | 7 | 2 | 1,50 | 1,82 | 130 | 120 | 750 | 2,84 |
| 200-400 mm | 25 | 14 | 13 | 11 | 1 | 1,45 | 1,83 | 180 | 60 | 760 | 1,99 |

LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), LC (Limite de Contração), RP (Região de Plasticidade), RF (Região de Friabilidade), densidade do solo inicial (Dsi), densidade referente à pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$) e matéria orgânica (MO).

Na Tabela 12 é apresentado o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões da pressão de preconsolidação ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) para as profundidades de 0-200mm e 200-400mm da área 2.

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade, obtidas para as duas profundidades avaliadas diferenciaram-se estatisticamente, embora os ajustes tenham sido altamente significativos, os coeficientes de determinação variaram entre 83 e 86 %. Os coeficientes angulares foram negativos e atendem às prerrogativas do modelo.

Tabela 12. Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade | Parâmetros do modelo | | | Teste de Snedecor e Cochran |
|------------------|----------------------|---------|----------------|-----------------------------|
| | a | b | R ² | 0-200mm vs 200-400mm |
| 0-200mm | -0,1254 | -1,3943 | 86** | ** |
| 200-400mm | -0,1926 | -1,9266 | 83** | |

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

Pode-se inferir que a pressão de preconsolidação de ambas as profundidades são diferentes e devem ser estimadas por equações diferentes. Esta diferença certamente está associada aos atributos físicos e o histórico do manejo de cada profundidade. Os modelos de compressibilidade, obtidos para as condições desta área, evidenciam esses efeitos.

Nas Figuras 22 e 23, observa-se a resistência mecânica das profundidades avaliada através da pressão de preconsolidação. O comportamento dos modelos obtidos evidencia a influência direta da resistência mecânica sobre o manejo da área avaliada através da pressão de preconsolidação. Nestas figuras observa-se que valores de pressão de preconsolidação na profundidade de 0-200 mm, foram maiores do que os valores da profundidade 200-400 mm, especificamente na presença de teores mais elevados de água. Os maiores valores de pressão de preconsolidação observados nas duas profundidades, se associados aos estados de consistência desses solos, sugerem que, para o próximo preparo, especificamente nessa área, a estimativa dos carregamentos a serem aplicados deve ter como referência a pressão de preconsolidação.

A decisão do momento ideal do preparo, considerando a região de friabilidade (RF), deve ser repensada, pois, como mostra as Figuras 22 e 23, além das

diferenças na pressão de preconsolidação entre profundidades, percebe-se uma variação nos estados de consistência, principalmente na região de friabilidade. Esses resultados, portanto, denotam a necessidade de se identificar o conteúdo de água dentro da região de friabilidade que de fato, possa ser representativa para que, mediante os modelos de compressibilidade, a pressão de preconsolidação do solo seja criteriosamente estimada.

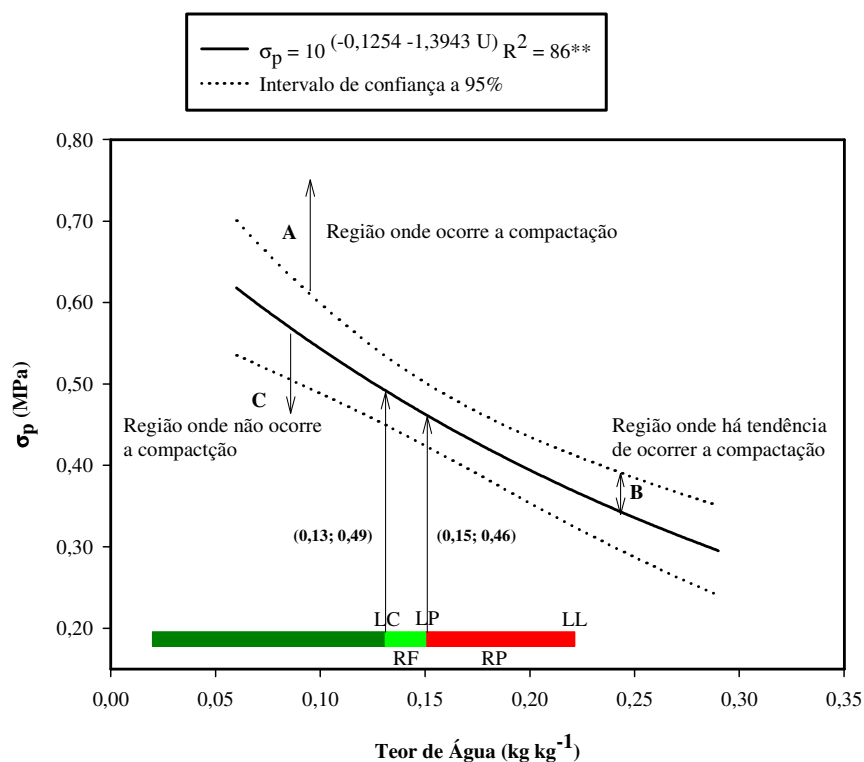


Figura 22. Modelos de compressibilidade da Área 2, na profundidade de 0 a 200mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo.

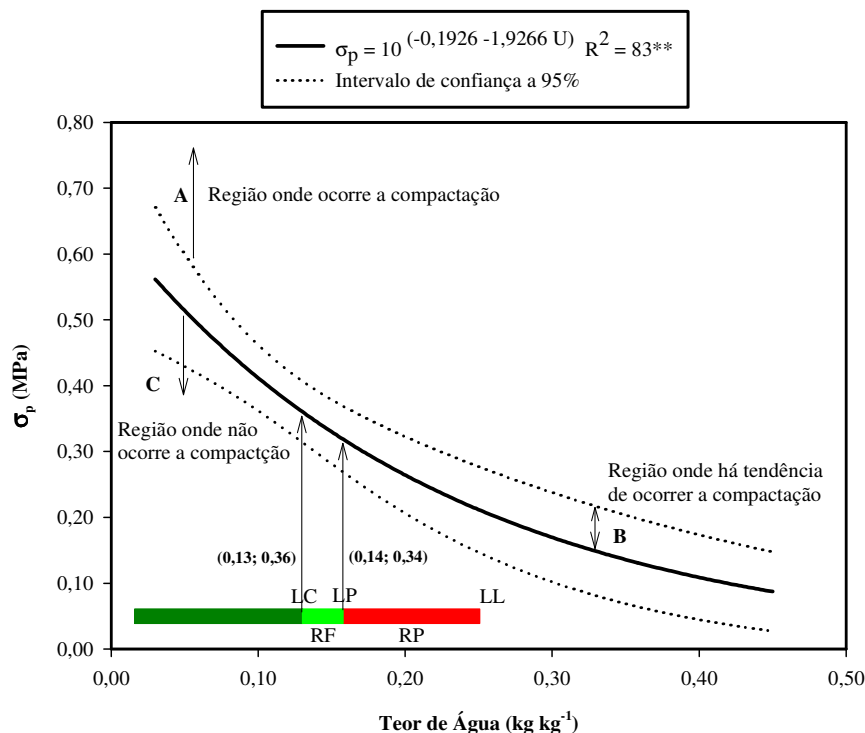


Figura 23. Modelos de compressibilidade da Área 2, na profundidade de 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo.

Para avaliar a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração medida através do índice de cone, foi preciso relacionar a pressão de pré-consolidação com o índice de cone, através da equação $\sigma_p = a + b (IC)$, para todas as camadas de índice de cone analisadas. Pode ser observado na Tabela 13 onde está apresentado o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões.

As profundidades IC 0-100mm e IC 100-200mm diferiram estatisticamente das equações obtidas para as profundidades IC 200-300mm e IC 300-400mm, e entre elas não foram observadas diferença estatística. Certificada a não-significância entre as equações registradas nas camadas mais profundas, juntaram-se assim, os valores de teor de água e de pressão de pré-consolidação e novas equações foram ajustadas e novamente testadas com as demais camadas. Assim, observa-se que a equação para IC 200-300mm + IC 300-

400mm diferiram das outras equações, como pode ser verificado na Tabela 13, depois de recalcularem os valores de F.

Tabela 13. Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade (mm) | Teste de Snedecor e Cochran |
|---|-----------------------------|
| | F |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,2415 + 0,0682$ (IC) $R^2 = 81^{**}$ vs. IC 100-200 : $\sigma_p = 0,2393 + 0,0317$ (IC) $R^2 = 85^{**}$ | ** |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,2415 + 0,0682$ (IC) $R^2 = 81^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,1772 + 0,1217$ (IC) $R^2 = 78^{**}$ | ** |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,2415 + 0,0682$ (IC) $R^2 = 81^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 0,0580 + 0,0596$ (IC) $R^2 = 79^{**}$ | ** |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,2393 + 0,0317$ (IC) $R^2 = 85^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,1772 + 0,1217$ (IC) $R^2 = 78^{**}$ | ** |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,2393 + 0,0317$ (IC) $R^2 = 85^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 0,0580 + 0,0596$ (IC) $R^2 = 79^{**}$ | ** |
| IC 200-300 : $\sigma_p = 0,1772 + 0,1217$ (IC) $R^2 = 78^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 0,0580 + 0,0596$ (IC) $R^2 = 79^{**}$ | ns |
| <u>Recalculando o F para os modelos que não diferiam estatisticamente</u> | |
| IC 0-100 : $\sigma_p = 0,2415 + 0,0682$ (IC) $R^2 = 81^{**}$ vs. IC 200-300 + IC 300-400 : $\sigma_p = -0,0884 + 0,1237$ (IC) $R^2 = 80^{**}$ | ** |
| IC 200-300 : $\sigma_p = 0,1772 + 0,1217$ (IC) $R^2 = 85^{**}$ vs. IC 200-300 + IC 300-400 : $\sigma_p = -0,0884 + 0,1237$ (IC) $R^2 = 80^{**}$ | ** |

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

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(\text{IC})$ na identificação da compactação do solo, a pressão de preconsolidação para a profundidade de IC 0-100mm e IC 100-200mm, foram estimadas por meio da equação $\sigma_p = 0,2415 + 0,0682(\text{IC})$ e $\sigma_p = 0,2393 + 0,0317(\text{IC})$ respectivamente. Já no caso das profundidades de IC 200-300mm e IC 300-400mm, resultou na obtenção de uma única equação para duas profundidade de índice de cone, que foi $\sigma_p = -0,0884 + 0,1237(\text{IC})$ pois estes não apresentaram diferença significativa. Portanto, a Área 2 nas profundidades estudadas apresentaram equações distintas para estimar a pressão de preconsolidação em função do índice de cone.

Nas Figuras 22 e 23 estão apresentados os modelos de capacidade de suporte de carga, onde se podem observar as três regiões consideradas. A partir do comportamento da equação ajustada a estes modelos é possível identificar através da pressão de preconsolidação estimada por meio da equação $\sigma_p = a + b(\text{IC})$, que camada, grade ou solo esteve mais consolidado, ou seja, 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.

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(\text{IC})$ na identificação da compactação do solo, foram selecionados os valores do índice de cone obtidos na profundidade de IC 100-200mm com um teor de água médio de 13,64 % e 20,43 % (amostragens 2 e 4 respectivamente).

Foram selecionados de forma aleatória dois pontos (Z_1 e Z_2) com coordenadas geográficas conhecidas, correspondentes à época da amostragem 2 e, igualmente esses mesmos pontos já selecionados, correspondentes à época da amostragem 4.

A pressão de preconsolidação foi estimada por meio da equação $\sigma_p = 0,2393 + 0,0317(\text{IC})$, plotado na Figura 24. Nesta, observa-se que a pressão de preconsolidação determinada no ponto Z_1 da amostragem 2 localiza-se na região onde ocorrer a compactação do solo, enquanto que o mesmo ponto (Z_1) obtido na amostragem 4, situa-se na região em que não ocorre compactação do solo, embora esteja localizado na região de plasticidade (RP), ou seja, onde qualquer operação mecanizada que se pretenda realizar pode afetar a estrutura do solo. Já no ponto Z_2 obtido na amostragem 2, que encontra-se localizado na região em que não ocorre compactação do solo, que igual ao ponto Z_2 registrado na

amostragem 4, também localiza-se na mesma região de plasticidade (RP), onde qualquer seja a operação mecanizada que se pretenda realizar compromete a estrutura do solo.

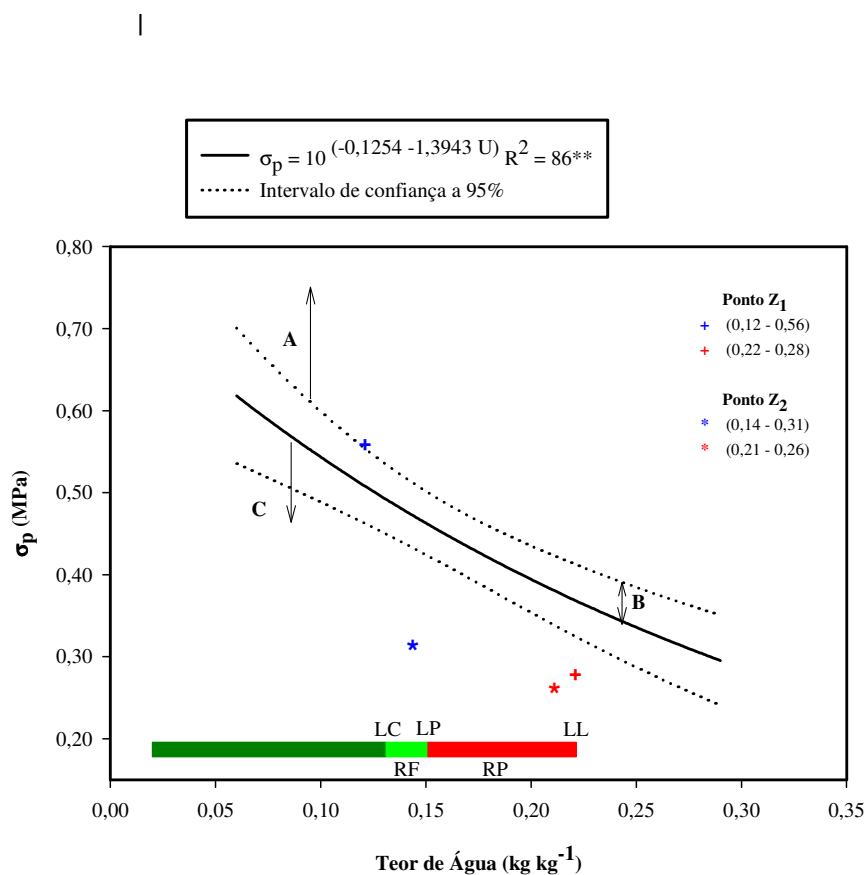


Figura 24. Modelos de compressibilidade da Área 2, na profundidade de 0 a 200mm, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo.

6.3 Área 3

Na Tabela 14, são apresentados os momentos estatísticos dos valores do índice de cone e teor de água nas diferentes amostragens realizadas. Assim, constatou-se que alguns destes dados afastavam-se da curva de distribuição normal e diminuía a

aproximação do conjunto a ela. Estes dados que apresentavam uma distribuição não normal foram os valores de teor de água nas amostragens 2 e 3, nas duas profundidades analisadas.

Inicialmente, observou-se que a grande maioria, ou seja, 75 % dos valores de índice de cone apresentaram uma assimetria positiva e 4 valores (25 %) uma assimetria negativa. Porém, esta tendência não aconteceu com os valores do teor de água, onde apenas 40% dos valores apresentaram assimetria positiva e mais da metade assimetria negativa. Com relação ao total dos valores do índice de cone e teor de água, 67% apresentaram uma distribuição de frequência leptocúrtica. Os demais dados apresentaram distribuição de frequência platicúrtica.

Igualmente, pode-se observar que os valores da média e variância do índice de cone das camadas de 0-100 mm apresentaram valores menores do que as demais camadas. O mesmo pode ser observado no teor de água, embora a sua porcentagem esteja muito acima nas duas camadas estudadas.

Os maiores índice de cone variaram de 10,67 a 15,30 MPa, os quais foram observados nas diferentes amostragens na profundidade de 100-200 mm, sendo a exceção a amostragem 1, onde, o máximo índice de cone foi obtido na camada de 300-400 mm, mais cabe ressaltar que nesta amostragem o solo apresentava o maior teor de água.

A grande maioria dos valores do índice de cone nas diferentes profundidades apresentaram uma variabilidade média do coeficiente de variação. Já no teor de água a variabilidade dos coeficientes de variação foi de média para baixo. Os coeficientes de variação do índice de cone variaram de 16,50% a 45,81%, os quais foram encontrados nas primeiras profundidades, já nas camadas subseqüentes apresentaram valores menores, fato que pode ser explicado, em razão da primeira camada possuir maior predisposição aos fatores externos da compactação, enquanto que, a segunda camada, encontra-se já mais protegida desses fatores externos e diretos da compactação. Mas nas amostragens 2 e 3, os coeficientes de variação apresentaram uma continuidade de porcentagens elevadas até a profundidade de 300 a 400 mm. Os coeficientes de variação para o teor de água variaram entre 8,96 % e 21,38 %.

Tabela 14. Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 3.

| Variável (mm) | Média MPa | Variância | Desv. Pad. | C.V. % | Mínimo MPa | Máximo MPa | Assimetria | Curtose |
|---------------------|--------------|-----------|------------|-----------|---------------|---------------|------------|---------|
| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,58 | 0,42 | 0,65 | 41,29 | 0,31 | 3,66 | 0,668 | 0,411 |
| IC 100-200 | 2,37 | 0,46 | 0,68 | 28,54 | 0,55 | 3,93 | 0,260 | -0,326 |
| IC 200-300 | 2,21 | 0,26 | 0,51 | 23,23 | 1,04 | 3,67 | 0,474 | 0,265 |
| IC 300-400 | 2,13 | 0,17 | 0,41 | 19,25 | 1,24 | 3,41 | 0,505 | 0,567 |
| T. água 0-200 (%) | 29,59 | 1,82 | 1,35 | 4,56 | 25,06 | 34,01 | -0,100 | 1,755 |
| T. água 200-400 (%) | 31,00 | 2,94 | 1,71 | 5,53 | 27,44 | 39,58 | 1,184 | 2,061 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,95 | 0,33 | 0,57 | 29,27 | 0,40 | 3,49 | 0,035 | -0,083 |
| IC 100-200 | 3,64 | 0,36 | 0,60 | 16,50 | 1,05 | 5,19 | -0,552 | 2,756 |
| IC 200-300 | 3,64 | 0,53 | 0,73 | 20,07 | 2,04 | 6,33 | 1,008 | 2,058 |
| IC 300-400 | 4,15 | 1,60 | 1,26 | 30,45 | 1,51 | 10,42 | 1,328 | 4,847 |
| T. água 0-200 (%) | 28,29 | 7,95 | 2,82 | 9,97 | 20,86 | 52,25 | 6,016 | 52,490 |
| T. água 200-400 (%) | 28,20 | 6,38 | 2,53 | 8,96 | 11,34 | 31,82 | -5,199 | 32,470 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 2,68 | 1,13 | 1,06 | 39,62 | 0,47 | 6,14 | 0,488 | 0,755 |
| IC 100-200 | 5,36 | 3,16 | 1,78 | 33,17 | 1,33 | 9,95 | -0,297 | -0,131 |
| IC 200-300 | 5,00 | 3,13 | 1,77 | 35,35 | 1,77 | 10,20 | 0,017 | -0,009 |
| IC 300-400 | 4,43 | 1,98 | 1,41 | 31,72 | 1,62 | 8,38 | 0,156 | -0,629 |
| T. água 0-200 (%) | 21,18 | 20,49 | 4,53 | 21,38 | 17,00 | 59,52 | 6,513 | 52,630 |
| T. água 200-400 (%) | 22,71 | 14,35 | 3,79 | 16,68 | 19,21 | 44,59 | 4,418 | 22,830 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 2,81 | 1,07 | 1,03 | 36,78 | 0,40 | 6,36 | 0,465 | 0,521 |
| IC 100-200 | 6,83 | 2,59 | 1,61 | 23,54 | 3,42 | 10,67 | 0,198 | -0,209 |
| IC 200-300 | 7,05 | 2,15 | 1,47 | 20,78 | 2,65 | 10,65 | 0,089 | 0,448 |
| IC 300-400 | 6,04 | 1,57 | 1,25 | 20,72 | 1,86 | 8,70 | -0,536 | 1,142 |
| T. água 0-200 (%) | 17,96 | 4,35 | 2,09 | 11,61 | 9,38 | 24,70 | -0,289 | 3,394 |
| T. água 200-400 (%) | 21,80 | 5,67 | 2,38 | 10,92 | 17,76 | 27,32 | 0,603 | -0,547 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 2,52 | 1,34 | 1,16 | 45,81 | 0,87 | 7,10 | 1,415 | 2,487 |
| IC 100-200 | 6,91 | 4,33 | 2,08 | 30,08 | 3,24 | 15,30 | 1,152 | 2,247 |
| IC 200-300 | 8,17 | 4,38 | 2,09 | 25,62 | 2,92 | 13,51 | 0,450 | -0,001 |
| IC 300-400 | 7,82 | 3,69 | 1,92 | 24,56 | 2,17 | 12,82 | -0,183 | 0,497 |
| T. água 0-200 (%) | 17,49 | 5,79 | 2,41 | 13,75 | 12,05 | 21,00 | -0,534 | -0,775 |
| T. água 200-400 (%) | 18,90 | 3,11 | 1,76 | 9,33 | 14,04 | 22,98 | -0,464 | 0,067 |

Na Tabela 15, são apresentadas as matrizes de correlação do índice de cone e teor de água no solo para todas as amostragens. Pode-se verificar que a grande maioria dos dados obtidos nas profundidades do índice de cone nas diferentes amostragens, apresentaram uma correlação de baixa a nula moderada, todas negativas, ou seja, à medida que se aumenta os teores de água no solo se teve um decréscimo dos valores do índice de cone ou vice versa.

O modelo teórico que melhor tem-se ajustado ao semivariograma correspondeu ao tipo exponencial, que tem-se ajustado a 27 dos 30 dados do índice de cone e teor de água no solo estudados. Para os valores que não apresentaram estacionaridade do semivariograma, optou-se por modelar os resíduos. Após tentativas não bem sucedidas de ajustes dos resíduos, voltou-se a trabalhar com os dados originais, sendo, portanto, ajustados ao efeito pepita puro, que neste caso indicou falta de dependência espacial para distâncias maiores que a menor distância de amostragem adotada (10 m), demonstrando assim, que os dados têm uma distribuição aleatória, variação que o uso de parâmetros da estatística clássica explica.

Para as camadas do índice de cone de 0-100 mm, 100-200 mm e 200-300 mm de profundidade, os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais têm correspondido aos tipos exponenciais em todos os casos das amostragens. Já para a camada do índice de cone de 300-400 mm de profundidade, na amostragem 1, observou-se uma falta de dependência espacial, de modo que os valores da semivariância, já seja, em função da distância, ou bem por se situarem em torno mais ou menos próximo à variância amostral apresentaram uma tendência errática.

Portanto a estrutura que melhor representa a distribuição espacial para essa camada é o efeito pepita pura, embora as demais amostragens tenham apresentado um modelo exponencial. Um ajuste semelhante tem-se apresentado também no teor de água no solo, nas amostragens 2 e 3.

Tabela 15. Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da área 3.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------------|
| Variável (mm) | IC 0-100 | IC 100-200 | IC 200-300 | IC 300-400 | T. água 0-200 | T. água 200-400 |
| IC 0-100 | 1 | 0,80 | 0,40 | 0,17 | -0,05 | 0,03 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,65 | 0,26 | -0,05 | -0,06 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,48 | -0,07 | -0,05 |
| IC 300-400 | | | | 1 | 0,12 | -0,07 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | -0,32 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,53 | 0,26 | -0,02 | -0,13 | 0,05 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,60 | 0,25 | -0,10 | -0,03 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,54 | -0,04 | -0,08 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,02 | -0,06 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | -0,04 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,73 | 0,47 | 0,38 | 0,06 | -0,08 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,82 | 0,67 | 0,04 | -0,13 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,81 | -0,05 | -0,15 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,10 | -0,02 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,03 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,77 | 0,23 | 0,09 | -0,12 | 0,07 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,45 | 0,22 | -0,07 | 0,03 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,62 | -0,08 | -0,04 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,07 | -0,01 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,39 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,80 | 0,40 | 0,16 | -0,04 | 0,03 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,64 | 0,25 | -0,04 | -0,06 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,47 | -0,06 | -0,05 |
| IC 300-400 | | | | 1 | 0,11 | -0,07 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | -0,32 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |

** $r > 0,25$ significativo a 1% de probabilidade

* $r > 0,19$ significativo a 5% de probabilidade.

As informações sobre a análise geoestatística e os modelos de semivariogramas experimentais ajustados para cada uma das profundidades e teor de água no

solo, nas diferentes amostragens realizadas na área, as quais apresentaram presença de dependência espacial dos dados, podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 3.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|-------------|
| Variável (mm) | Modelo | C₀ | C₁ | a | r² | RMSE |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,30 | 0,14 | 100,00 | -0,376 | 0,002 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,37 | 0,10 | 100,00 | 0,035 | 0,002 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,20 | 0,08 | 100,00 | -0,344 | 0,001 |
| IC 300-400 | Efeito pepita puro | | | | | |
| T. água 0-200 | Exponencial | 1,00 | 0,82 | 26,86 | -0,284 | 0,015 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 0,08 | 2,90 | 16,30 | -0,076 | 0,029 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,24 | 0,10 | 60,00 | 0,393 | 0,001 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,27 | 0,11 | 60,00 | -0,079 | 0,002 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,30 | 0,24 | 60,00 | 0,296 | 0,003 |
| IC 300-400 | Exponencial | 1,03 | 0,63 | 100,00 | 0,447 | 0,009 |
| T. água 0-200 | Efeito pepita puro | | | | | |
| T. água 200-400 | Exponencial | 0,80 | 0,34 | 60,00 | 0,1472 | 0,0080 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,63 | 0,54 | 80,00 | 0,060 | 0,010 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,81 | 2,63 | 80,00 | -0,044 | 0,026 |
| IC 200-300 | Exponencial | 1,00 | 2,47 | 80,00 | 0,314 | 0,016 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,81 | 1,35 | 80,00 | 0,907 | 0,005 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 3,17 | 19,12 | 100,00 | 0,540 | 0,189 |
| T. água 200-400 | Efeito pepita puro | | | | | |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,94 | 0,17 | 100,00 | 0,376 | 0,002 |
| IC 100-200 | Exponencial | 2,00 | 0,61 | 41,53 | 0,344 | 0,008 |
| IC 200-300 | Exponencial | 1,60 | 0,65 | 80,00 | -0,337 | 0,012 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,00 | 1,59 | 18,36 | 0,349 | 0,010 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,00 | 4,36 | 35,09 | 0,498 | 0,037 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 5,03 | 0,82 | 100,00 | 0,256 | 0,022 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 1,20 | 0,14 | 60,00 | -0,237 | 0,006 |
| IC 100-200 | Exponencial | 3,29 | 1,05 | 60,00 | -0,252 | 0,028 |
| IC 200-300 | Exponencial | 3,81 | 0,60 | 49,84 | -0,246 | 0,026 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,00 | 3,86 | 27,74 | 0,561 | 0,022 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,46 | 5,63 | 42,78 | 0,752 | 0,019 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 2,50 | 0,75 | 100,00 | -0,219 | 0,015 |

O grau de dependência espacial para o índice de cone e teor de água nas diferentes amostragens foi em 40 % dos casos moderada. Para os demais dados que apresentaram dependência espacial, esta porcentagem foi de forte para fraca.

No que diz respeito aos parâmetros de alcance para o índice de cone e teor de água no solo, de forma geral, foram maiores do que a distância entre as amostras (10 m) para todas as amostragens realizadas. O alcance dos 30 semivariogramas teóricos ajustados oscilaram entre 16,30 m e 100 m. Pode-se constatar assim, que os maiores alcances foram registrados na amostragem 1, tanto valores que atingiram os 100 m para o índice de cone, quanto, os menores alcances de teor de água, o que poder-se-ia dever ao alto conteúdo de água no solo registrado nessa amostragem.

Dos parâmetros de validação cruzada consignados na Tabela 16 se deduz que os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais parecem adequados, embora apresentassem certas diferenças com relação aos valores dos parâmetros da validação cruzada que se consideram ideais.

A partir dos semivariogramas ajustados para o índice de cone nas diferentes amostragens, foi realizada a interpolação e geração dos mapas pelo método da krigagem, para os dados que apresentaram continuidade espacial e patamar determinado, porém quando os dados não apresentavam dependência espacial e uma baixa correlação, e quando apresentavam dependência, mas com uma validação cruzada demonstrando uma baixa correlação, optou-se por interpolar os dados através do método de inverso da distância

Os dados de penetrometria coletados apresentaram uma série de informações importantes com relação a teor de água na área. Ao se analisarem, visualmente, cada mapa de isocompactação do solo representadas nas Figuras 25 a 28, notou-se que, em todos eles, as áreas com maior ou menor resistência à penetração estavam bem definidas, variando unicamente a intensidade das resistências em função do conteúdo de água no solo.

Da mesma forma, ao serem analisados os mapas da Figura 25, para o índice de cone de 0-100mm de profundidade, consegue-se perceber um aumento no índice de cone, de uma média geral de 1,58 a 2,81 MPa, para as 5 diferentes épocas da amostragem, na medida em que o solo apresentou diminuição no conteúdo de água. Além disso, é de salientar que a partir da amostragem 3, houve semelhança nos valores do índice de cone quando comparado com os mapas das amostragens 3 e 4, apresentando uma predominância da faixa da

cor verde (2 a 4 MPA), embora o valor máximo do índice de cone registrado nessa camada não tenha ultrapassado os 3 MPA. Em consequência disso pode-se dizer que há sinais de compactação do solo, o que pode ser caracterizado ou causado pelo tráfego de máquinas agrícolas.

Conforme os mapas do índice de cone de 100-200 mm de profundidade, observados na Figura 26, podemos dizer que houve um comportamento parecido no aumento do índice de cone com o mapa anterior (índice de cone de 0-100 mm de profundidade), na medida em que diminuiu a porcentagem de água no solo, os valores médios da resistência do solo à penetração tem-se incrementado, quase 3 vezes o seu valor (de 2,37 a 6,91 MPA, sobretudo com uma predominância da faixa da cor de verde escuro (6 a 8 MPA) para as épocas de amostragens 4 e 5.

Para os mapas do índice de cone de 300-400 mm de profundidade (Figura 27), observaram-se valores de resistência à penetração do solo bastante acentuados já com um valor médio de teor de água de 31 %, sobretudo nas épocas das amostragens 4 e 5, onde registraram-se os maiores índices de compactação de toda a Área 3. O índice de cone médios variaram de 7,05 a 8,17 MPA, com predominância das faixas da cor marrom claro e marrom (6 a 8 MPA e de 8 a 10 MPA) e alguma inserção da faixa da cor marrom escuro (10 a 12 MPA), embora o solo nessa profundidade apresentara um teor de água maior às duas camadas anteriormente avaliadas.

Para a camada mais profunda, nos mapas do índice de cone de 300-400 mm de profundidade (Figura 28) surgiram valores de resistência do solo à penetração bastante semelhante, quanto comparado com os mapas anteriores (IC 200-300 mm de profundidade), nas mesmas épocas de amostragens, mas com uma pequena diminuição dos índices médios de resistência do solo, que foi de 6,04 a 7,82 MPA.

Por meio da mensuração do índice de cone na área estudada, verificou-se que a variabilidade espacial da compactação apresentou diferentes intensidades em função do conteúdo de água no solo. Essa variabilidade também existe em profundidades, onde podemos afirmar que independentemente do teor de água, existe uma camada compactada entre 100 e 400 mm de profundidade máxima, que foram analisadas, com base nos níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas (2 MPA).

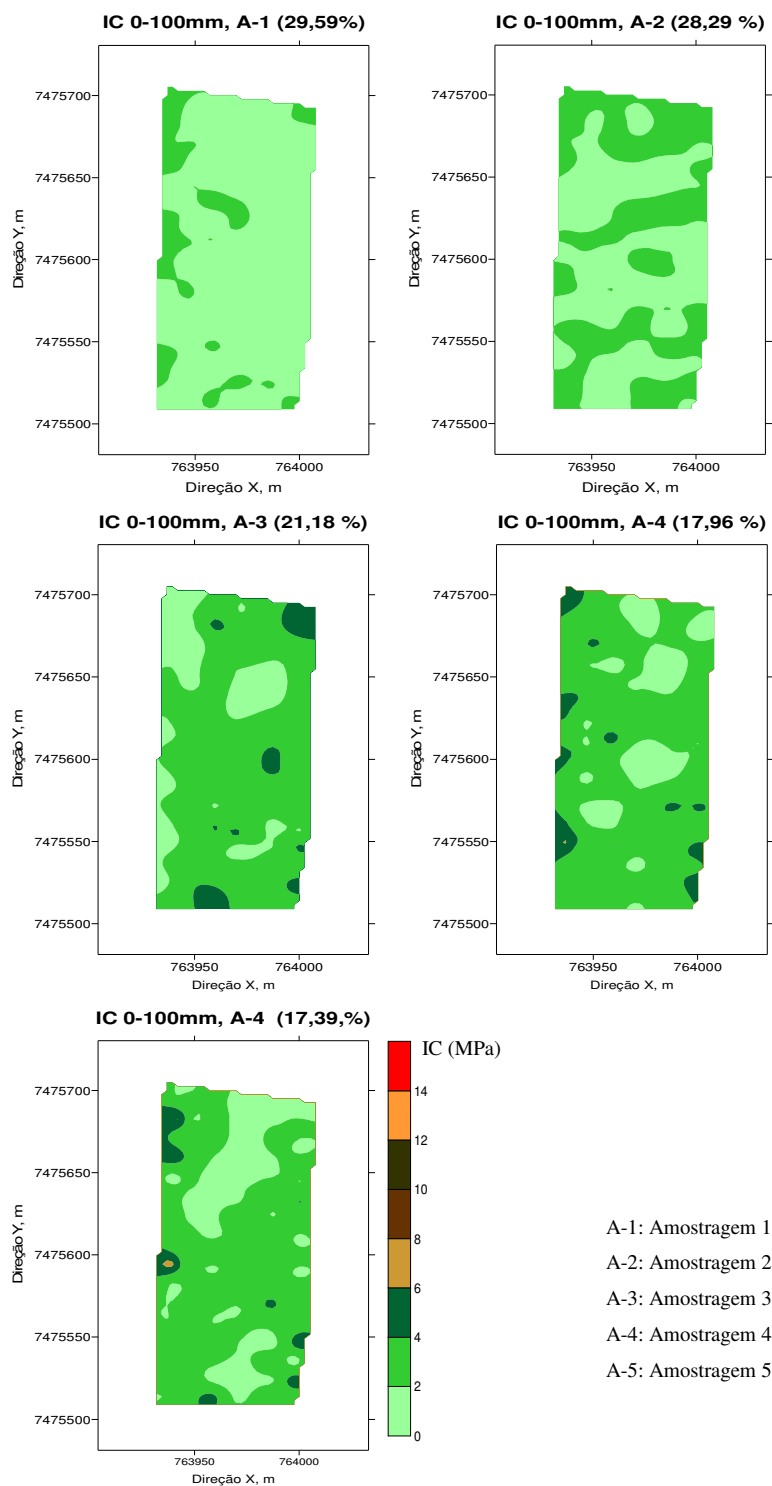


Figura 25. Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3.

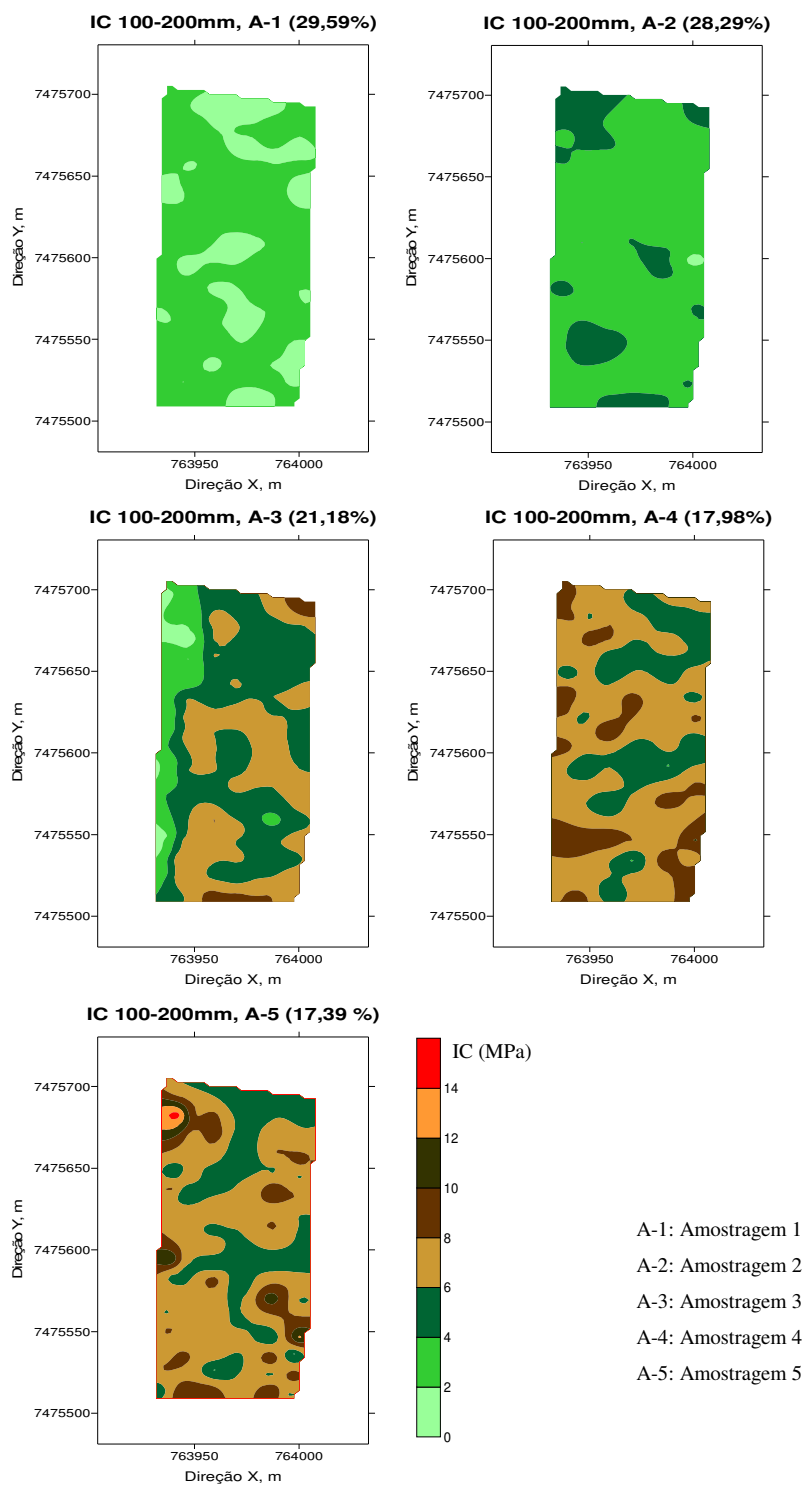


Figura 26. Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3.

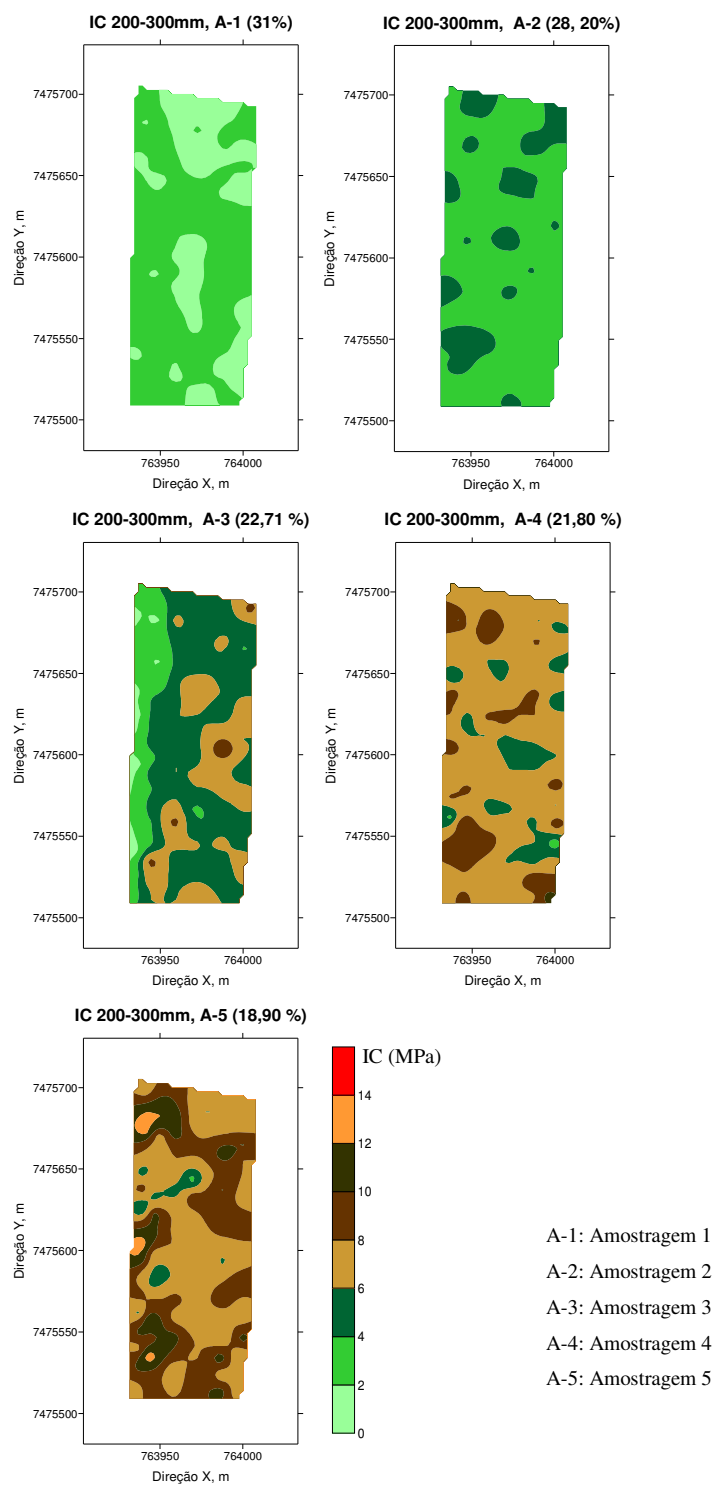


Figura 27. Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3.

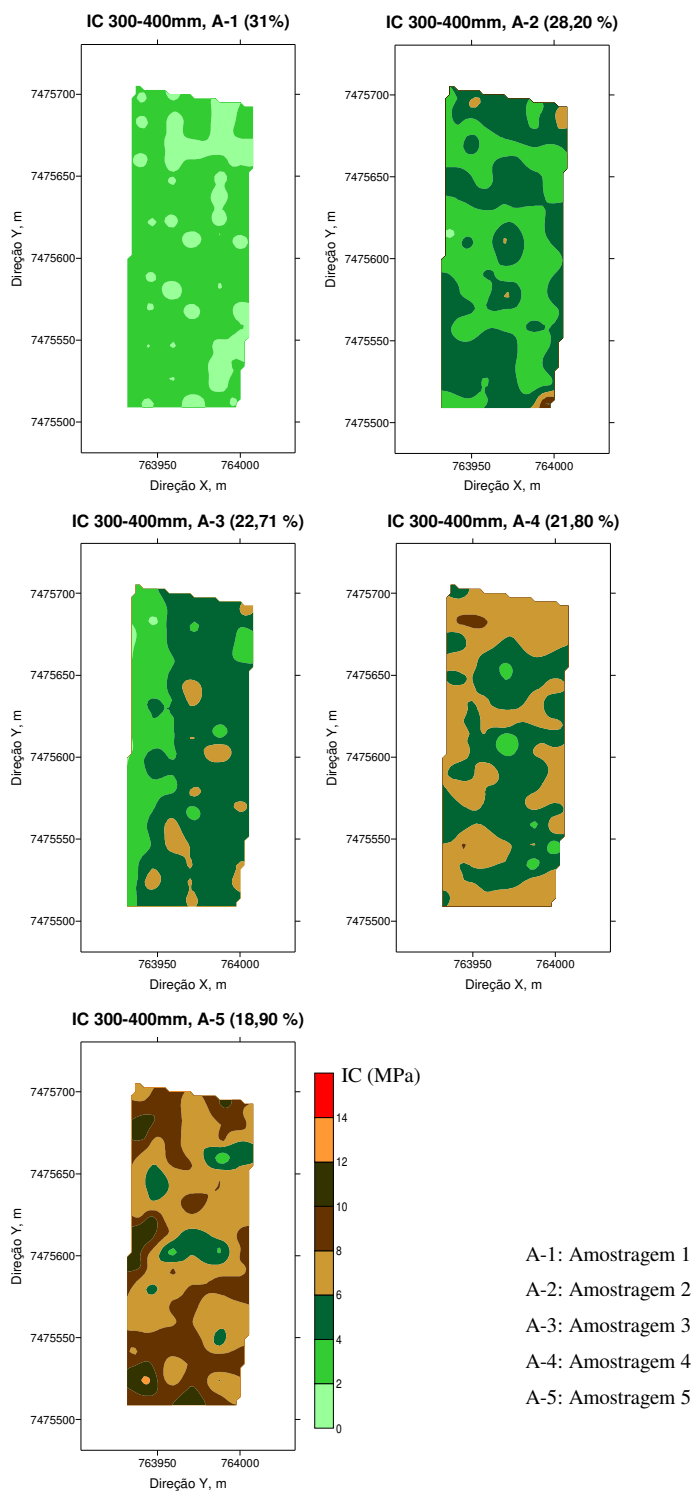


Figura 28. Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 3.

Os resultados das análises físicas de caracterização do solo são apresentados na Tabela 17. Quando analisada a faixa de friabilidade (LP – LC) pode-se observar uma faixa maior da mesma em comparação aos outros solos analisados, sobretudo na segunda profundidade, fato que pode representar uma vantagem com relação à mecanização deste solo.

Os valores de densidade do solo inicial foram diferentes nas duas profundidades. Com base nos modelos de compressibilidade e nos limites de consistências foi estimada a densidade na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), onde as duas profundidades apresentaram valores diferentes. O que significa um manejo diferenciado da área, no que se refere aos preparos ou tráfego de máquinas.

Tabela 17. Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica.

| Profundidade | Limite de Consistência do solo (%) | | | | | Densidade (kg m^{-3}) | | Textura (g kg^{-1}) | | | MO (g kg^{-1}) |
|-------------------|------------------------------------|----|----|----|----|----------------------------------|--------------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------|
| | LL | LP | LC | RP | RF | Dsi | $Ds\sigma_p$ | Argila | Silte | Areia | |
| 0-200 mm | 42 | 26 | 20 | 17 | 6 | 1,82 | 1,93 | 670 | 170 | 160 | 39,1 |
| 200-400 mm | 43 | 25 | 19 | 15 | 6 | 1,53 | 1,64 | 700 | 150 | 150 | 33,7 |

LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), LC (Limite de Contração), RP (Região de Plasticidade), RF (Região de Friabilidade), densidade do solo inicial (Dsi), densidade referente à pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$) e matéria orgânica (MO).

Na Tabela 18 é apresentado o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões da pressão de preconsolidação ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) para as profundidades de 0-200mm e 200-400mm da área 3.

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade, obtidas para as duas profundidades avaliadas não se diferenciaram estatisticamente, os coeficientes de determinações variaram entre 96 e 97 %. Juntaram-se então os valores de teor de água e de

pressão de preconsolidação e uma nova equação foi ajustada. Os coeficientes angulares foram negativos e atendem as prerrogativas do modelo.

Tabela 18. Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade | Parâmetros do modelo | | | Teste de Snedecor e Cochran |
|------------------|----------------------|---------|----------------|-----------------------------|
| | a | b | R ² | 0-200mm vs 200-400mm |
| 0-200mm | 0,0154 | -1,5422 | 97** | ns |
| 200-400mm | 0,1120 | -1,1523 | 96** | |

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

Pode-se inferir que a pressão de preconsolidação de ambas as profundidades não diferem entre si e devem ser estimadas por uma única equação, estimada por $\sigma_p = 10^{(-0,0790 - 1,2566.U)}$, $R^2 = 93**$. O modelo de compressibilidade obtidos para as condições desta área, pode ser observada na Figura 29.

O comportamento do modelo obtido evidencia a influência direta da resistência mecânica sobre o manejo da área avaliada através da pressão de preconsolidação. Na Figura 29, observa-se que valores de pressão de preconsolidação nas profundidades avaliadas foram maiores do que os valores das outras áreas, especificamente na presença de teores de água mais baixo. Os maiores valores de pressão de preconsolidação observado se associados aos estados de consistência desses solos, sugerem que, para o próximo preparo, especificamente nessa área, a estimativa dos carregamentos a serem aplicados deve ter como referência a pressão de preconsolidação.

A decisão do momento ideal do preparo, considerando a região de friabilidade (RF), deve ser repensada, pois, como mostra a Figura 29, percebe-se uma maior faixa nos estados de consistência, principalmente na região de friabilidade. Esses resultados,

portanto, denotam a necessidade de se identificar o conteúdo de água dentro da região de friabilidade que, de fato, possa ser representativa para que, mediante os modelos de compressibilidade, a pressão de preconsolidação do solo seja criteriosamente estimada.

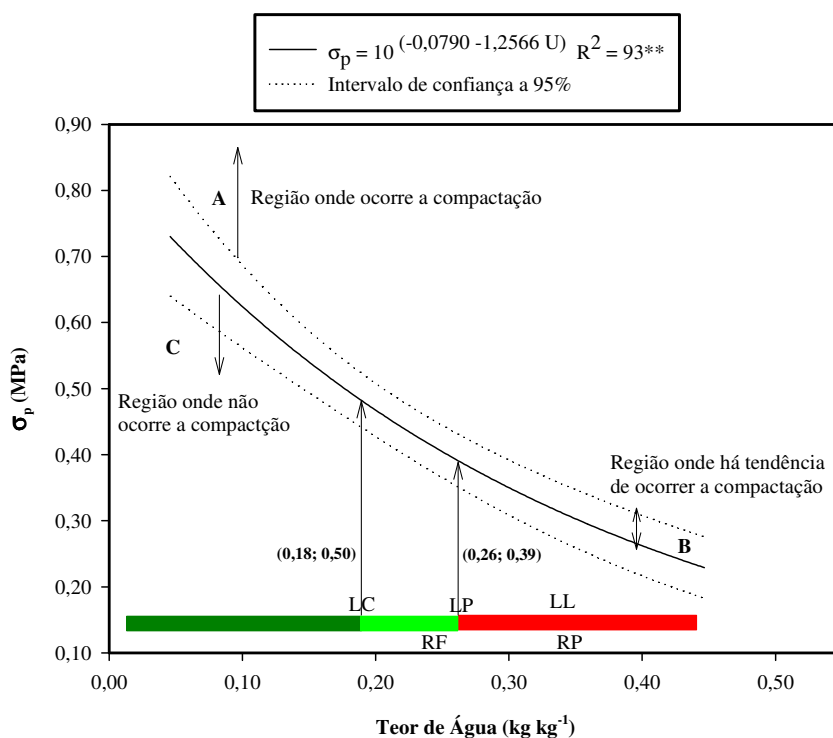


Figura 29. Modelos de compressibilidade da Área 3, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo.

Para avaliar a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração medida através do índice de cone, foi preciso relacionar a pressão de preconsolidação com o índice de cone, através da equação $\sigma_p = a + b (IC)$, para todas as camadas de índice de cone analisadas. Pode ser observado na Tabela 19 o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões. Nota-se que nas profundidades em que foram analisados os índice de cone nesta área, não foi registrada diferença estatística entre as mesmas. Portanto foram agrupados os valores de índice de cone e de pressão de preconsolidação e uma nova equação foi ajustada.

Tabela 19. Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade (mm) | Teste de Snedecor e Cochran |
|---|-----------------------------|
| | F |
| IC 0-100 : $\sigma_p = -0,7013 + 0,2555$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ vs. IC 100-200 : $\sigma_p = 0,9011 + 0,8813$ (IC) $R^2 = 90^{**}$ | Ns |
| IC 0-100 : $\sigma_p = -0,7013 + 0,2555$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = -1,9979 + 0,2483$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ | Ns |
| IC 0-100 : $\sigma_p = -0,7013 + 0,2555$ (IC) $R^2 = 91^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = -1,2454 + 0,2156$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ | Ns |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,9011 + 0,8813$ (IC) $R^2 = 90^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = -1,9979 + 0,2483$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ | Ns |
| IC 100-200 : $\sigma_p = 0,9011 + 0,8813$ (IC) $R^2 = 90^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = -1,2454 + 0,2156$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ | Ns |
| IC 200-300 : $\sigma_p = -1,9979 + 0,2483$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = -1,2454 + 0,2156$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ | Ns |
| <u>Recalculando o F para os modelos que não difereiam estadisticamente</u> | |
| IC 200-300 + IC 200-300 + IC 200-300 + IC 300-400 : $\sigma_p = 0,1530 + 0,0471$ (IC) $R^2 = 89^{**}$ | |

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

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(\text{IC})$ na identificação da compactação do solo, as pressões de preconsolidação para a profundidade de IC 0-100mm, IC 100-200mm, IC 200-300mm e IC 300-400mm foram estimadas por meio de uma única equação $\sigma_p = 0,1530 + 0,0471(\text{IC})$, em função que os mesmos não apresentaram diferença significativa.

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(\text{IC})$ na identificação da compactação do solo, foram selecionados os valores do índice de cone obtidos na profundidade de IC 200-300mm com um teor de água médio de 18,90 % e 31 % (amostragens 1 e 5 respectivamente). Foram selecionados de forma aleatória dois pontos (Z_1 e Z_2) com coordenadas geográficas conhecidas, correspondentes à época da amostragem 1 e, igualmente esses mesmos pontos já selecionados, correspondentes à época da amostragem 5.

A pressão de preconsolidação foi estimada por meio da equação $\sigma_p = 0,1530 + 0,0417(\text{IC})$, plotado na Figura 30. Nesta, observa-se que a pressão de preconsolidação determinada no ponto Z_1 da amostragem 1 localiza-se na região onde ocorre a compactação do solo, enquanto que o mesmo ponto (Z_1) obtido na amostragem 5, situa-se na região em que não ocorre compactação do solo, embora esteja localizado na região de plasticidade (RP), ou seja, onde qualquer operação mecanizada que se pretenda realizar pode afetar a estrutura do solo. O ponto Z_2 obtido na amostragem 1, também encontra-se localizado na região onde ocorre compactação do solo, que curiosamente esta dentro da região de friabilidade (RF) deste solo, mas o tráfego só seria admitido para valores menores de σ_p 0,47 MPa com o mesmo teor de água. Já ponto Z_2 registrado na amostragem 5, situa-se na região em que não ocorre compactação do solo, embora esteja localizado na região de plasticidade (RP), ou seja, onde qualquer operação mecanizada que se pretenda realizar pode afetar a estrutura do solo.

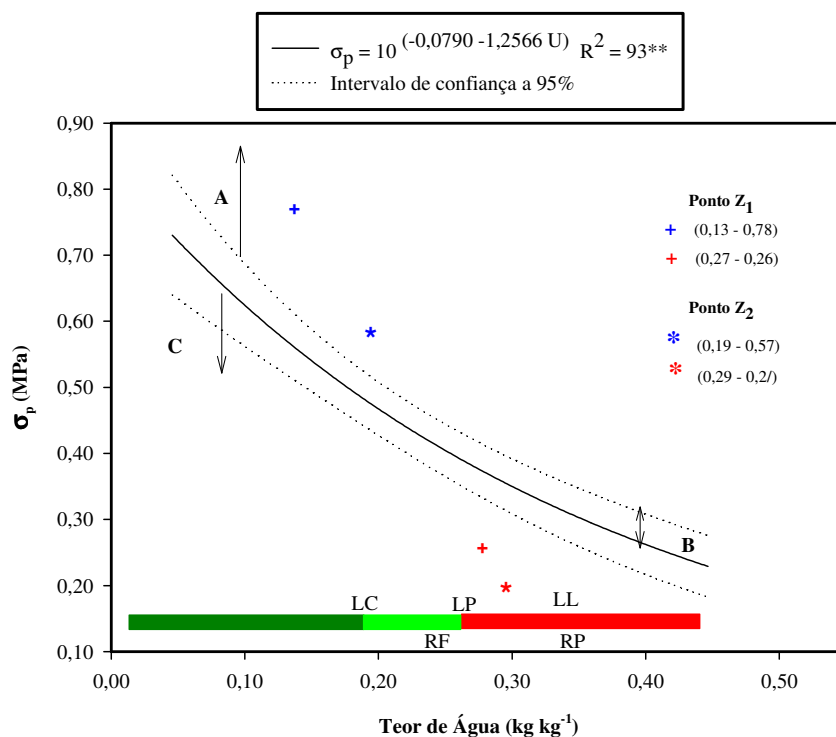


Figura 30. Modelos de compressibilidade da Área 3, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com os critérios utilizados na identificação da compactação do solo.

6.4 Área 4

Os resultados da estatística descritiva da área 4, para os valores de índice de cone, bem como os valores do teor de água, obtidas nas diferentes épocas de amostragens, podem ser observados na Tabela 20.

Constatou-se que alguns destes dados afastavam-se da curva de distribuição normal e diminuía a aproximação do conjunto a ela. Estes dados que apresentavam uma distribuição não normal foram os valores de índice de cone na amostragem 1, profundidade de 300-400 mm e no teor de água de 0-200 mm. Na amostragem 2 também foram registrados dados do índice de cone com desvio da normalidade nas camadas de 200 a 400 mm de profundidade.

Para os coeficientes de assimetria dos valores de índice de cone apresentaram 80 % das profundidades analisadas uma assimetria positiva e somente 2 profundidades assimetria negativa. Já os valores do teor de água, apresentaram 60 % assimetria negativa e o restante assimetria positiva. O coeficiente de curtose do índice de cone e teor de água no solo, 73,33 % apresentou distribuição de frequência leptocúrtica. Para os valores que apresentaram distribuição de frequência platicúrtica, que neste caso foi a grande maioria dos valores do teor de água.

Pode-se observar na Tabela 20, que os maiores valores do índice de cone variaram de 10,39 a 10,95 MPa, os quais foram registrados na amostragem 4, embora o máximo índice de cone foi obtido na camada de 100-200 mm, mas na amostragem 5, cabe ressaltar que os dados registrados nesta amostragem não estão tão longe das obtidas na amostragem anterior.

O coeficiente de variação para índice de cone apresentou uma variabilidade de média do coeficiente de variação, os quais variaram entre 33,41 a 56,45 %. Já para o teor de água variabilidades do coeficiente de variação foram de média para baixo.

Tabela 20. Parâmetros da estatística descritiva referente ao IC e teor de água da Área 4.

| Variável (mm) | Média MPa | Variância | D. P. | C.V. % | Mínimo MPa | Máximo MPa | Assimetria | Curtose |
|----------------------------|--------------|-----------|-------|-----------|---------------|---------------|------------|---------|
| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,23 | 0,30 | 0,55 | 44,68 | 0,09 | 2,52 | -0,05 | -0,01 |
| IC 100-200 | 2,85 | 0,93 | 0,96 | 33,82 | 0,68 | 5,06 | 0,16 | -0,01 |
| IC 200-300 | 3,00 | 1,76 | 1,33 | 44,29 | 1,52 | 7,44 | 1,51 | 1,83 |
| IC 300-400 | 2,92 | 1,88 | 1,37 | 46,95 | 1,51 | 8,17 | 2,01 | 4,48 |
| T. água 0-200 (%) | 21,31 | 8,42 | 2,90 | 13,62 | 15,63 | 33,11 | 1,44 | 5,21 |
| T. água 200-400 (%) | 22,02 | 8,23 | 2,87 | 13,03 | 15,75 | 27,77 | -0,37 | -0,34 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,16 | 0,22 | 0,47 | 40,86 | 0,10 | 2,50 | 0,07 | 1,38 |
| IC 100-200 | 2,50 | 1,35 | 1,16 | 46,52 | 0,19 | 7,21 | 1,94 | 6,24 |
| IC 200-300 | 2,40 | 1,37 | 1,17 | 48,82 | 0,48 | 6,59 | 1,78 | 4,14 |
| IC 300-400 | 2,52 | 1,89 | 1,38 | 54,72 | 1,32 | 7,94 | 2,27 | 5,98 |
| T. água 0-200 (%) | 21,82 | 8,75 | 2,96 | 13,56 | 14,34 | 27,29 | -0,84 | 0,41 |
| T. água 200-400 (%) | 23,49 | 13,94 | 3,73 | 15,89 | 12,43 | 30,49 | -0,59 | 0,60 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 1,90 | 0,65 | 0,81 | 42,59 | 0,37 | 3,76 | 0,19 | -0,45 |
| IC 100-200 | 3,98 | 1,76 | 1,33 | 33,41 | 1,66 | 7,21 | 0,38 | -0,18 |
| IC 200-300 | 3,29 | 2,83 | 1,68 | 51,10 | 1,36 | 8,92 | 1,92 | 2,64 |
| IC 300-400 | 2,95 | 2,47 | 1,57 | 53,27 | 1,44 | 8,60 | 1,85 | 3,06 |
| T. água 0-200 (%) | 20,12 | 3,97 | 1,99 | 9,91 | 15,58 | 23,42 | -0,47 | -0,68 |
| T. água 200-400 (%) | 22,33 | 11,45 | 3,38 | 15,15 | 15,86 | 34,36 | 0,70 | 2,42 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 2,58 | 1,31 | 1,14 | 44,39 | 0,36 | 4,77 | -0,52 | -0,41 |
| IC 100-200 | 5,88 | 3,51 | 1,87 | 31,90 | 2,54 | 10,73 | 0,70 | 0,22 |
| IC 200-300 | 4,83 | 4,26 | 2,06 | 42,75 | 2,21 | 10,95 | 1,23 | 1,01 |
| IC 300-400 | 3,92 | 4,48 | 2,12 | 54,02 | 1,83 | 10,39 | 1,67 | 2,16 |
| T. água 0-200 (%) | 16,79 | 4,59 | 2,14 | 11,61 | 14,18 | 24,05 | 0,79 | 0,74 |
| T. água 200-400 (%) | 18,28 | 9,12 | 3,02 | 14,71 | 15,92 | 31,53 | 0,86 | 2,36 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | | | |
| IC 0-100 | 2,71 | 2,32 | 1,52 | 56,29 | 0,32 | 6,00 | 0,54 | -0,41 |
| IC 100-200 | 6,24 | 12,40 | 3,52 | 56,45 | 0,82 | 16,95 | 1,43 | 1,96 |
| IC 200-300 | 4,40 | 4,47 | 2,12 | 48,02 | 0,55 | 9,63 | 0,94 | 0,84 |
| IC 300-400 | 3,38 | 1,22 | 1,10 | 32,69 | 0,77 | 7,39 | 1,11 | 2,24 |
| T. água 0-200 (%) | 18,45 | 6,14 | 2,48 | 14,76 | 8,84 | 22,77 | -0,41 | 2,20 |
| T. água 200-400 (%) | 20,53 | 5,35 | 2,31 | 12,66 | 11,01 | 23,03 | -0,77 | 1,29 |

As matrizes de correlação do índice de cone e teor de água no solo para todas as épocas de amostragens, são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21. Matriz de correlação do IC e o teor de água no do solo da área 4.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|---------------------|----------|------------|------------|------------|---------------|-----------------|
| Variável (mm) | IC 0-100 | IC 100-200 | IC 200-300 | IC 300-400 | T. água 0-200 | T. água 200-400 |
| IC 0-100 | 1 | 0,31 | -0,20 | -0,15 | 0,21 | 0,10 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,57 | 0,53 | -0,31* | -0,43** |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,93 | -0,40** | -0,50** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,39** | -0,51** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,56 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,60 | 0,23 | 0,09 | -0,25 | -0,21 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,81 | 0,61 | -0,26 | -0,39** |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,86 | -0,02 | -0,24 |
| IC 300-400 | | | | 1 | 0,03 | -0,13 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,49 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,35 | -0,19 | -0,34 | -0,13 | 0,07 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,71 | 0,51 | -0,45** | -0,04 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,88 | -0,31* | -0,26 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,32* | -0,27 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,13 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,43 | -0,23 | -0,24 | -0,17 | -0,04 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,58 | 0,42 | -0,34* | -0,52** |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,92 | -0,37* | -0,59** |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,34* | -0,61** |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,40 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | 1 | 0,84 | 0,62 | 0,48 | -0,26 | -0,12 |
| IC 100-200 | | 1 | 0,87 | 0,68 | -0,32* | -0,22 |
| IC 200-300 | | | 1 | 0,78 | -0,16 | -0,11 |
| IC 300-400 | | | | 1 | -0,10 | -0,13 |
| T. água 0-200 | | | | | 1 | 0,61 |
| T. água 200-400 | | | | | | 1 |

** $r > 0,37$ significativo a 1% de probabilidade

* $r > 0,29$ significativo a 5% de probabilidade.

Com base nos limites propostos para o r^2 , pode-se observar na Tabela 20 que a grande maioria dos dados obtidos nas profundidades do índice de cone de 100-200 ao 300-400 mm nas diferentes amostragens, apresentaram uma correlação significativa baixa a moderada, todas negativas, ou seja, na medida que se aumenta o teor de água no solo há um decréscimo dos valores de índice de cone ou vice versa. A maior correlação encontrada foi para um r^2 de 0,61**, obtida na camada 300-400 mm na amostragem 5.

A análise espacial dos dados do índice de cone e teor de água no solo para as diferentes épocas de amostragens da Área 4, foram analisados utilizando-se os semivariogramas experimentais. Os parâmetros tabulados da análise geoestadística e os modelos de semivariograma experimental ajustados para cada uma das profundidades dos índices de cone e teor de água no solo, das diferentes épocas de amostragens, podem ser observados na Tabela 22.

O modelo teórico que melhor tem-se ajustado ao semivariograma do índice de cone e teor de água, obtidos nas diferentes profundidades e épocas de amostragens, corresponderam ao tipo exponencial, que se tem ajustado em 90 % dos dados. Somente foi registrado um modelo gaussiano e esférico. Para os valores que não apresentaram estacionaridade do semivariograma, optou-se por modelar os resíduos, sendo, portanto, ajustados ao modelo efeito pepita puro, que neste caso somente a camada de 0-100 mm da amostragem 3 apresentou falta de dependência espacial para distâncias maiores que a menor distância de amostragem adotada (10 m), demonstrando assim, que os dados têm uma distribuição aleatória.

A dependência espacial para o índice de cone e teor de água nas diferentes épocas de amostragens, foi em 60 % dos casos forte. Para os demais dados que apresentaram dependência espacial, esta porcentagem foi moderada (36,67 %).

O alcance da dependência espacial para o índice de cone de forma geral foram maiores do que a distância entre as amostras (10 m) para as épocas de amostragens realizadas. O alcance dos 20 semivariogramas teóricos ajustados oscilaram entre 20,51 m e 90 m. Pode-se constatar assim, que os maiores alcances foram registrados nas amostragens 3 e 4. No caso dos teores de água no solo, os alcances apresentaram uma variação de 24,61 a 90 m.

Tabela 22. Parâmetros do semivariograma para IC e teor de água da Área 4.

| AMOSTRAGEM 1 | | | | | | |
|------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|-------------|
| Variável (mm) | Modelo | C₀ | C₁ | a | r² | RMSE |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,00 | 0,32 | 22,37 | 0,996 | 0,002 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,00 | 1,27 | 20,51 | -0,253 | 0,009 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,00 | 0,75 | 26,74 | 0,410 | 0,005 |
| IC 300-400 | Esferico | 0,19 | 0,62 | 60,00 | -0,134 | 0,008 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,45 | 30,75 | 60,00 | 0,431 | 0,323 |
| T. água 200-400 | Gaussiano | 22,13 | 23,42 | 60,00 | -0,099 | 0,810 |
| AMOSTRAGEM 2 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,00 | 0,24 | 40,00 | 0,989 | 0,001 |
| IC 100-200 | Exponencial | 0,00 | 1,38 | 37,06 | 0,734 | 0,016 |
| IC 200-300 | Exponencial | 0,00 | 1,40 | 36,24 | 0,821 | 0,012 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,00 | 1,90 | 40,42 | 0,794 | 0,020 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,00 | 9,01 | 26,10 | 0,733 | 0,077 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 0,00 | 14,37 | 37,27 | 0,881 | 0,078 |
| AMOSTRAGEM 3 | | | | | | |
| IC 0-100 | | Efeito pepita puro | | | | |
| IC 100-200 | Exponencial | 1,31 | 0,52 | 87,34 | 0,826 | 0,005 |
| IC 200-300 | Exponencial | 1,50 | 1,34 | 90,00 | 0,779 | 0,023 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,50 | 2,04 | 90,00 | 0,808 | 0,032 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,00 | 4,22 | 35,21 | 0,786 | 0,035 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 6,00 | 5,03 | 47,82 | 0,166 | 0,228 |
| AMOSTRAGEM 4 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 0,60 | 0,98 | 57,71 | 0,990 | 0,012 |
| IC 100-200 | Exponencial | 2,60 | 1,21 | 90,00 | 0,962 | 0,006 |
| IC 200-300 | Exponencial | 1,50 | 2,67 | 90,00 | 0,555 | 0,080 |
| IC 300-400 | Exponencial | 1,00 | 3,39 | 90,00 | 0,616 | 0,088 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 1,00 | 3,50 | 24,61 | 0,881 | 0,015 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 0,00 | 11,10 | 74,16 | 0,886 | 0,108 |
| AMOSTRAGEM 5 | | | | | | |
| IC 0-100 | Exponencial | 1,00 | 1,36 | 28,37 | 0,992 | 0,018 |
| IC 100-200 | Exponencial | 9,79 | 2,34 | 90,00 | 0,205 | 0,207 |
| IC 200-300 | Exponencial | 3,43 | 0,96 | 49,94 | 0,269 | 0,055 |
| IC 300-400 | Exponencial | 0,60 | 0,66 | 28,60 | 0,353 | 0,019 |
| T. água 0-200 | Exponencial | 0,00 | 8,02 | 90,00 | 0,878 | 0,105 |
| T. água 200-400 | Exponencial | 0,00 | 7,06 | 90,00 | 0,866 | 0,082 |

Dos parâmetros de validação cruzada consignados na Tabela 22 deduz-se que os modelos teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais parecem adequados, embora apresentassem certas diferenças com respeito aos valores dos parâmetros da validação cruzada que se consideram ideais.

A partir dos semivariogramas ajustados para o índice de cone nas diferentes épocas de amostragens, foi realizada a interpolação e geração dos mapas pelo método da krigagem ordinária por pontos, para a estimação dos valores não medidos e construção dos mapas temáticos para cada parâmetro que apresentou dependência espacial e patamar determinado.

Quando os dados não apresentavam dependência espacial e com uma baixa correlação, e quando apresentavam dependência, mas com uma validação cruzada demonstrando uma baixa correlação, optou-se por interpolar os dados através do método do inverso da distância, que neste caso somente camada do índice de cone de 0-100 mm da amostragem 3. Para os demais dados, procedeu-se à interpolação efetuada através da krigagem.

Os dados de penetrometria coletados apresentaram uma série de informações importantes com relação ao teor de água na área. Ao se analisarem, visualmente, cada mapa de isocompactação (Figuras 31 a 35), observa-se que, em todos eles, as áreas com maior ou menor resistência à penetração estavam bem definidas, variando unicamente a intensidade das resistências em função do conteúdo de água no solo.

Da mesma forma, ao serem analisados os mapas da Figura 31, para o índice de cone de 0-100mm de profundidade, consegue-se perceber um aumento no índice de cone, de uma média geral de 1,23 a 2,71 MPa, para as 5 diferentes épocas da amostragem, na medida em que o solo apresentou diminuição no conteúdo de água. Além disso, é de salientar que a partir da amostragem 3, houve um aumento nos valores do índice de cone quando comparado com os mapas das amostragens 4 e 5, apresentando uma predominância das faixas verde e verde escuro (2 a 4 e 4 a 6 MPa), embora o valor máximo do índice de cone registrado nessa camada foi observado na amostragem 5, onde o solo apresentava-se com menor teor de água.

Para os mapas do índice do cone de 100-200 mm de profundidade (Figura 32), observaram-se valores de resistência à penetração do solo bastante acentuados já

com um valor médio do índice de cone 2,50 MPa a 6,24 MPa, sobretudo nas épocas das amostragens 4 e 5, onde registraram-se os maiores índices de compactação de toda a Área 4, sobretudo com uma predominância das faixas verde escuro, marrom e marrom escuro (4 a 6 MPa, 6 a 8 MPa e 8 a 10 MPa, respectivamente), para as épocas de amostragens 4 e 5, e algumas machas vermelhas.

No caso dos mapas do índice de cone de 200-300 mm de profundidade, observados na Figura 33, houve uma diminuição em comparação ao mapa do índice de cone da Figuras 32, com um índice médio de 3 a 4,83 MPa. Podendo-se observar um retornando com maior predominância da faixa da cor verde (4 a 6 MPa). Também nestas amostragens foi registrada uma diminuição das faixas verde escuro, marrom e marrom escuro.

Para a camada mais profunda, nos mapas do índice de cone de 300-400 mm de profundidade (Figura 34) surgiram valores de resistência do solo à penetração bastante semelhante, quanto comparado com os mapas anteriores (IC 200-300 mm de profundidade), nas mesmas épocas de amostragens, mas com uma pequena diminuição dos índices médios de resistência do solo, que foi de 2,52 a 3,92 MPa.

Por meio da mensuração do índice de cone na área estudada, verificou-se que a variabilidade espacial da compactação apresentou diferentes intensidades em função do conteúdo de água no solo. Essa variabilidade também existe em profundidades, existe uma camada compactada entre 200 e 400 mm de profundidade máxima, que foram analisadas, com base nos níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas (2 MPa).

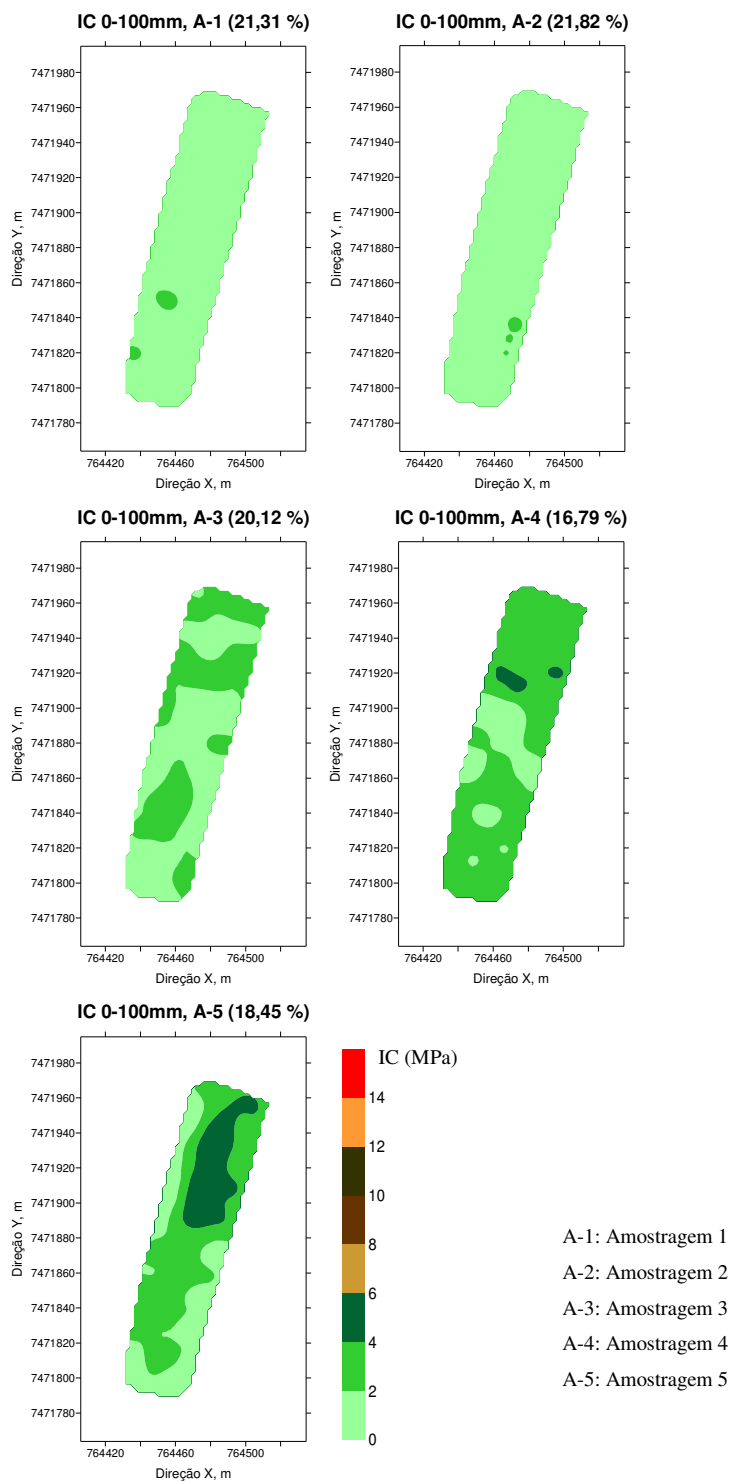


Figura 31. Mapas de atributos do índice de cone para 0-100 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4.

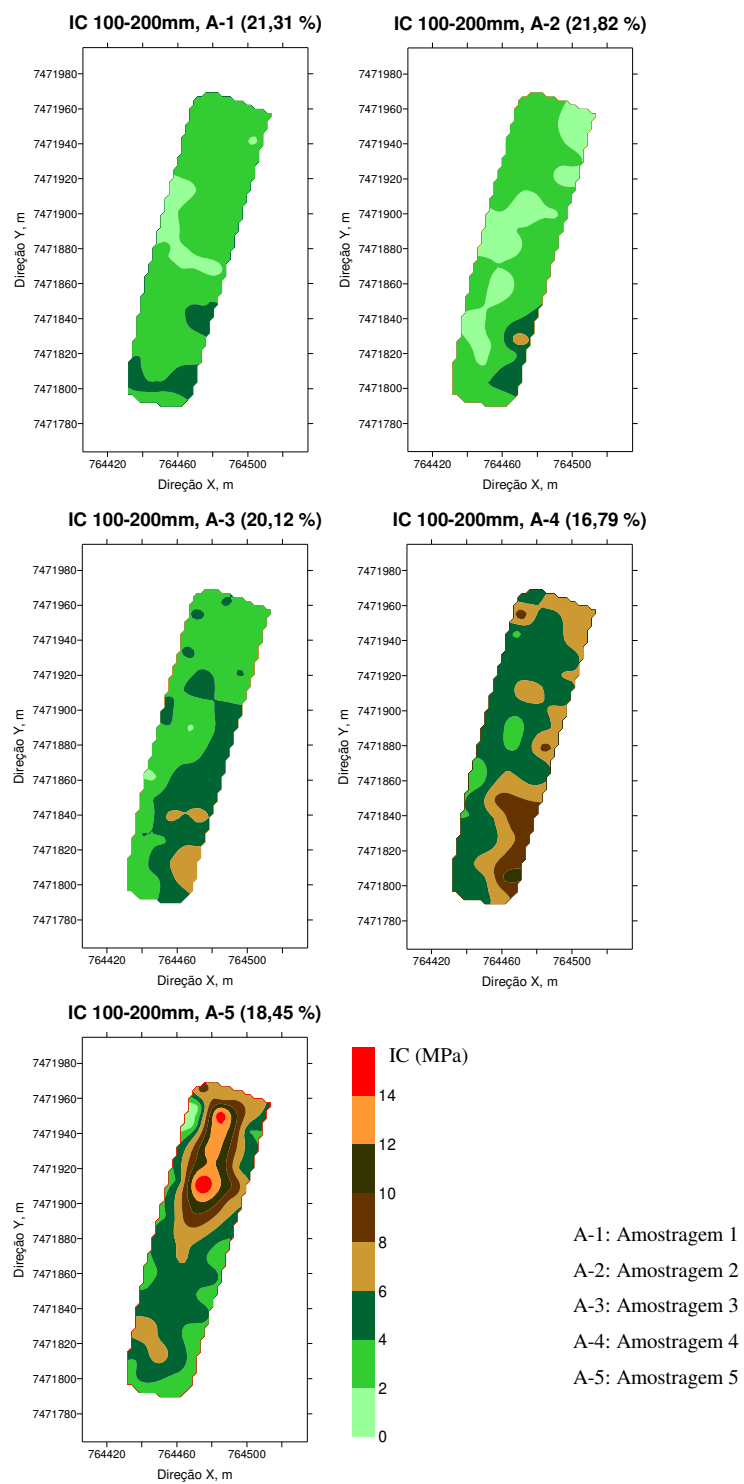


Figura 32. Mapas de atributos do índice de cone para 100-200 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4.

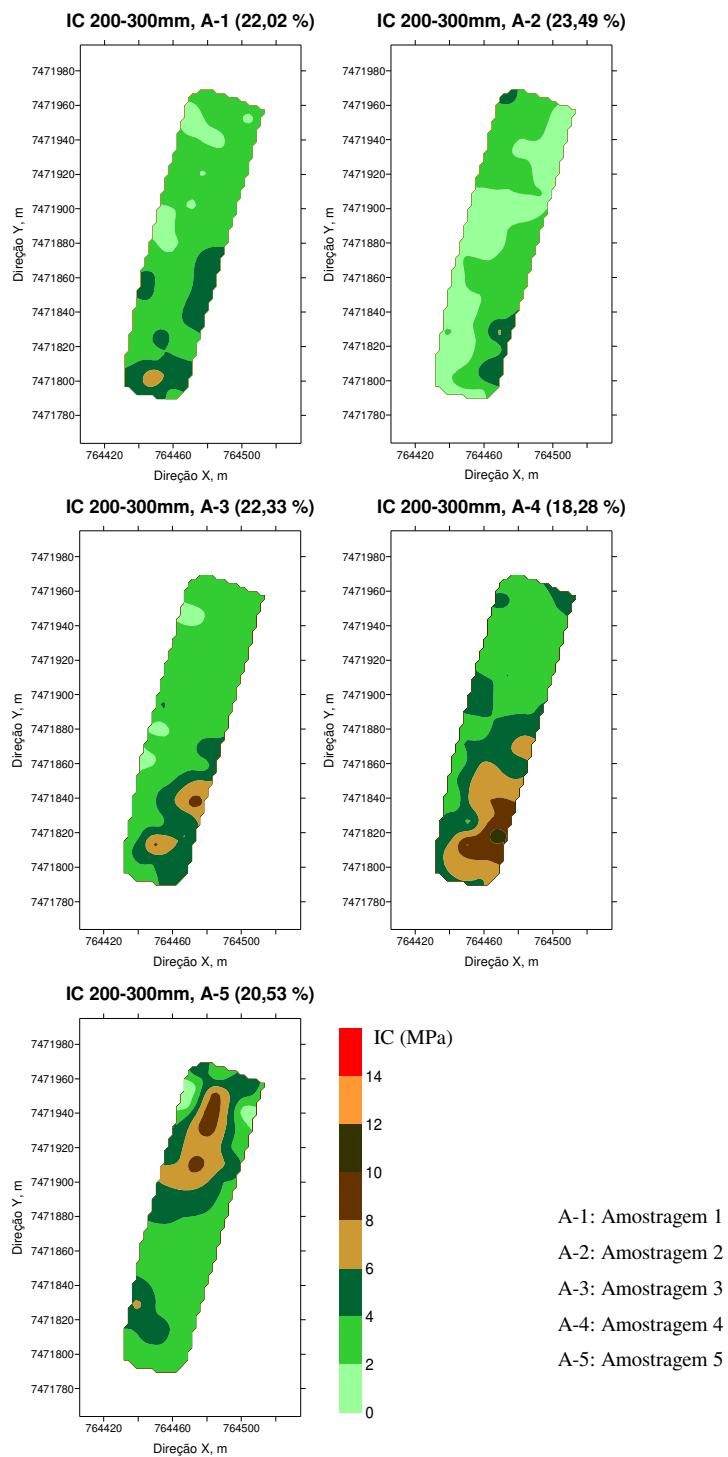


Figura 33. Mapas de atributos do índice de cone para 200-300 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4.

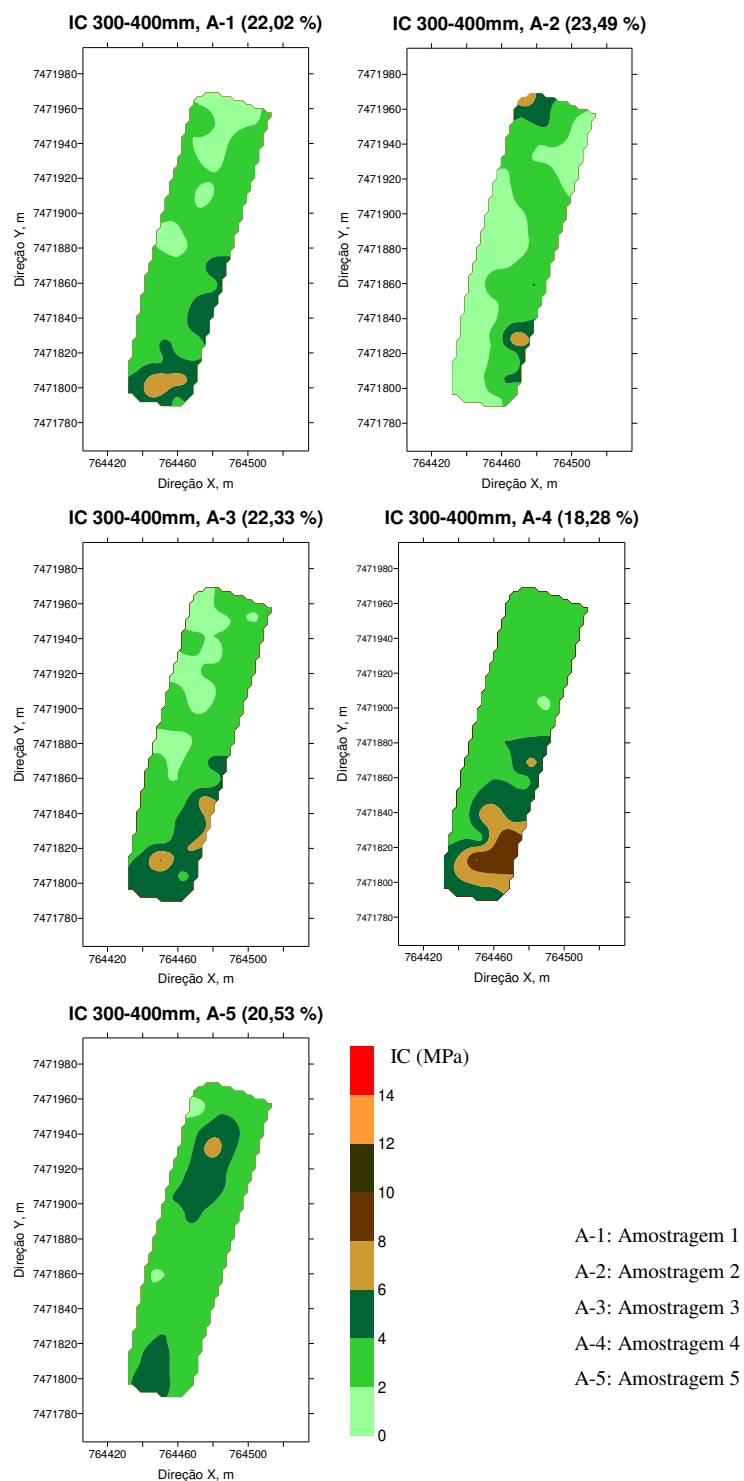


Figura 34. Mapas de atributos do índice de cone para 300-400 mm de profundidade e épocas de amostragens da Área 4.

Os resultados das análises físicas de caracterização do solo são apresentados na Tabela 23. Quando analisada a faixa de friabilidade (LP – LC) pode-se observar uma faixa maior da mesma em comparação aos solos da área 1 e 2 analisados, fato que pode representar uma desvantagem com relação à mecanização deste solo.

Os valores de densidade do solo inicial foram diferentes nas duas profundidades. Com base nos modelos de compressibilidade e nos limites de consistências foi estimada a densidade na pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$), onde as duas profundidades apresentaram valores diferentes. O que significa um manejo diferenciado da área, no que se refere aos preparos ou tráfego de máquinas.

Tabela 23. Limites de consistência, densidade do solo inicial, densidade na pressão de preconsolidação, textura e matéria orgânica.

| Profundidade | Limite de Consistência do solo (%) | | | | | Densidade (kg m ⁻³) | | Textura (g kg ⁻¹) | | | MO (g kg ⁻¹) |
|-------------------|------------------------------------|----|----|----|----|---------------------------------|---------------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------|
| | LL | LP | LC | RP | RF | Dsi | Ds σ_p | Argila | Silte | Areia | |
| 0-200 mm | 29 | 23 | 20 | 6 | 3 | 1,54 | 1,67 | 610 | 120 | 270 | 43,1 |
| 200-400 mm | 31 | 21 | 19 | 10 | 2 | 1,85 | 1,94 | 630 | 120 | 250 | 28,8 |

LL (Limite de Liquidez), LP (Limite de Plasticidade), LC (Limite de Contração), RP (Região de Plasticidade), RF (Região de Friabilidade), densidade do solo inicial (Dsi) e densidade referente à pressão de preconsolidação ($Ds\sigma_p$).

Na Tabela 24 é apresentado o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões da pressão de preconsolidação ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) para as profundidades de 0-200mm e 200-400mm da área 4.

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade, obtidas para as duas profundidades avaliadas não diferenciaram se estatisticamente, os coeficientes de determinações variaram entre 95 e 96 %. Juntaram-se assim, os valores do teor de água e de

pressão de preconsolidação e uma nova equação foi ajustada. Os coeficientes angulares foram negativos e atendem as prerrogativas do modelo.

Tabela 24. Parâmetros do modelo $\sigma_p = 10^{(a+bU)}$ com seus respectivos coeficientes de determinação e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade | Parâmetros do modelo | | | Teste de Snedecor e Cochran |
|--------------|----------------------|---------|----------------|-----------------------------|
| | a | b | R ² | 0-200mm vs 200-400mm |
| 0-200mm | 0,0731 | -1,5461 | 96** | ns |
| 200-400mm | -0,0379 | -1,9189 | 95** | |

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

Podendo-se inferir que a pressão de preconsolidação de ambas as profundidades não diferem entre si e devem ser estimadas por uma única equação, estimada por $\sigma_p = 10^{(-0,0577 - 1,7098.U)}$, $R^2 = 96^{**}$. O modelo de compressibilidade, obtidos para as condições desta área, pode-se observada na Figura 35. O comportamento do modelo obtido evidencia a influência direta da resistência mecânica sobre o manejo da área avaliada através da pressão de preconsolidação. Observa-se que valores de pressão de preconsolidação nas profundidades avaliadas foram menores aos valores obtidos na área 3 embora sejam do mesmo tipo de solo, especificamente, na presença de teor mais elevado de água. Os maiores valores de pressão de preconsolidação observado se associados aos estados de consistência desses solos, sugerem que, para o próximo preparo, especificamente nessa área, a estimativa dos carregamentos a serem aplicados deve ter como referência a pressão de preconsolidação.

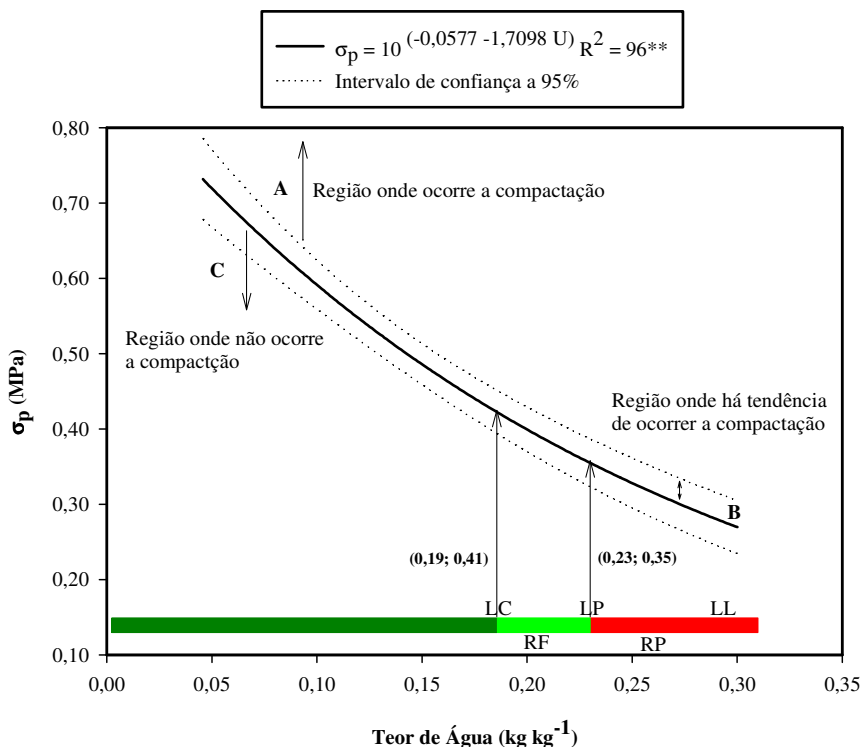


Figura 35. Modelos de compressibilidade da Área 4, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo.

Para avaliar a influência temporal do teor de água do solo na sua resistência à penetração medida através do índice de cone, foi preciso relacionar a pressão de preconsolidação com o índice de cone, através da equação $\sigma_p = a + b$ (IC), para todas as camadas de índice de cone analisadas. Pode ser observado na Tabela 24 o resumo da análise estatística da comparação das equações de regressões.

Nota-se que nas profundidades em que foram analisados o índice de cone nesta área, somente a profundidade IC 0-100mm diferiu estatisticamente das equações obtidas para as profundidades IC 200-300mm, IC 200-300mm e IC 300-400mm, que na mesma não foi observado diferença estatística. Certificada a não-significância entre as equações registradas nas camadas mais profundas, juntaram-se os valores de índice de cone e de pressão de preconsolidação e novas equações foram ajustadas e novamente testadas com as

demais camadas. Assim, observa-se que a equação para IC 100-200mm + IC 200-300mm + IC 300-400mm novamente diferiu da equação obtida na profundidade de IC 0-100mm, como pode ser verificado na Tabela 25, depois de recalculando os valores de F.

Tabela 25. Modelo de pressão de preconsolidação em função do índice de cone para as diferentes profundidades analisadas e comparação das equações obtidas entre profundidades segundo proposta de Snedecor e Cochran (1989).

| Profundidade (mm) | Teste de Snedecor e Cochran |
|--|-----------------------------|
| | F |
| IC 0-100 : $\sigma_p = - 1,2434 + 0,3995$ (IC) $R^2 = 93^{**}$ vs. IC 100-200 : $\sigma_p = - 0,1217 + 0,0494$ (IC) $R^2 = 95^{**}$ | ** |
| IC 0-100 : $\sigma_p = - 1,2434 + 0,3995$ (IC) $R^2 = 93^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,9599 + 0,1791$ (IC) $R^2 = 95^{**}$ | ** |
| IC 0-100 : $\sigma_p = - 1,2434 + 0,3995$ (IC) $R^2 = 93^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 1,4440 + 0,5896$ (IC) $R^2 = 96^{**}$ | ** |
| IC 100-200 : $\sigma_p = - 0,1217 + 0,0494$ (IC) $R^2 = 95^{**}$ vs. IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,9599 + 0,1791$ (IC) $R^2 = 95^{**}$ | ns |
| IC 100-200 : $\sigma_p = - 0,1217 + 0,0494$ (IC) $R^2 = 95^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 1,4440 + 0,5896$ (IC) $R^2 = 96^{**}$ | ns |
| IC 200-300 : $\sigma_p = - 0,9599 + 0,1791$ (IC) $R^2 = 95^{**}$ vs. IC 300-400 : $\sigma_p = - 1,4440 + 0,5896$ (IC) $R^2 = 96^{**}$ | ns |
| <u>Recalculando o F para os modelos que não diferiram estatisticamente</u> | |
| IC 0-100 : $\sigma_p = - 1,2434 + 0,3995$ (IC) $R^2 = 93^{**}$ vs. IC 100-200 + IC 200-300 + IC 300-400 : $\sigma_p = 0,2654 + 0,0325$ (IC) $R^2 = 96^{**}$ | ** |

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

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(\text{IC})$ na identificação da compactação do solo, a pressão de preconsolidação para a profundidade de IC 0-100mm foi a equação $\sigma_p = - 1,2434 + 0,3995(\text{IC})$. O caso das profundidades de IC 100-200mm + IC 200-300mm + IC 300-400mm, resultou na obtenção de uma única equação para as três profundidades do índice de cone, que foi $\sigma_p = 0,2654 + 0,0325(\text{IC})$, em função de que os mesmos não apresentaram diferença significativa. Portanto, a Área 4 nas profundidades estudadas apresentaram equações distintas para estimar a pressão de preconsolidação em função do índice de cone.

Para avaliar a aplicação da equação $\sigma_p = f(\text{IC})$ na identificação da compactação do solo, foram selecionados os valores do índice de cone obtidos na profundidade de IC 100-200mm com um teor de água médio de 18,45 % e 21,82 % (amostragens 2 e 5 respectivamente). Foram selecionados de forma aleatória dois pontos (Z_1 e Z_2) com coordenadas geográficas conhecidas, correspondentes à época da amostragem 2 e, igualmente esses mesmos pontos já selecionados, correspondentes à época da amostragem 5.

A pressão de preconsolidação foi estimada por meio da equação $\sigma_p = 0,2654 + 0,0325(\text{IC})$, plotado na Figura 36. Nesta, observa-se que a pressão de preconsolidação determinada no ponto Z_1 da amostragem 2 localiza-se na região onde ocorre a compactação do solo, como também o mesmo ponto (Z_1), mas obtido na amostragem 5, situa-se na região em que ocorre compactação do solo, embora esteja localizado na região de friabilidade (RF) deste solo, mas o tráfego só seria admitido para valores menor de σ_p 0,38 MPa com o mesmo teor de água, com base nessas informações, a decisão a tomar será a descompactação desse ponto. Já no ponto Z_2 obtido na amostragem 2, que encontra-se localizado na região onde há tendência de ocorrer compactação do solo, onde qualquer seja a operação mecanizada que se pretenda realizar comprometeria a estrutura do solo, que igual ao ponto Z_2 registrado na amostragem 5, situa-se na região em que não ocorre compactação do solo, embora esteja localizado no limite da região de friabilidade (RF) e a região do limite de contração (LC), onde o solo apresenta a maior capacidade de sustentação e qualquer tráfego não comprometida sua estrutura.

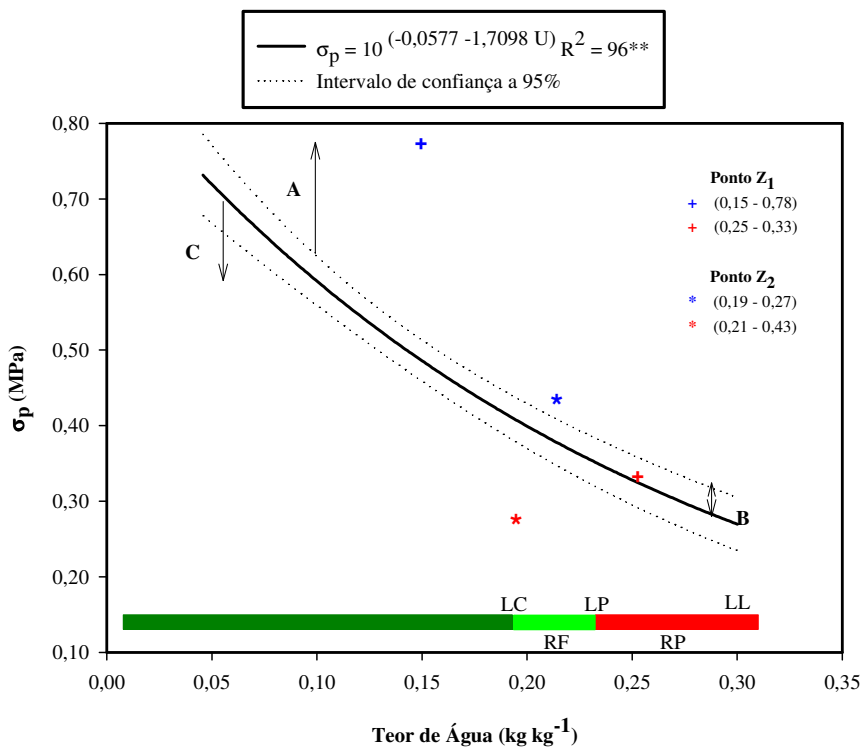


Figura 36. Modelos de compressibilidade da Área 4, nas profundidades de 0 a 200mm e 200 a 400mm, com seus respectivos limites e estados de consistência do solo.

7 CONCLUSÕES

Com base no objetivo proposto e os resultados obtidos neste estudo, destacam-se as seguintes conclusões:

Através da mensuração do índice de cone em grade amostral nas áreas estudadas constataram-se a ocorrência de valores menos elevados na superfície do solo (0-100mm). Também se evidenciou que as variabilidades espaciais da compactação apresentaram diferentes intensidades em função do conteúdo de água no solo, sendo que também se apresentou para as diferentes profundidades do solo.

Os valores médios do índice de cone e teor de água no solo, da área 1, ficaram entre 1,42 e 8,99 MPa e 9,59 a 17,63 % respectivamente. A área 2, os valores de índice de cone e teor de água estiveram entre 0,30 e 5,65 MPa, e 13,64 a 27,92 % respectivamente. No que diz respeito à área 3, o índice de cone foi de 1,58 a 8,17 MPa e para o conteúdo de água no solo, entre 17,46 e 31 %. Na última área analisada, a área 4, os valores do índice de cone e teor de água no solo, estiveram entre 1,16 e 6,24 MPa, e 16,76 a 23,49 % respectivamente, demonstrando uma notável heterogeneidade espacial destes elementos.

A evidência da relação entre o teor de água do solo e o índice de cone nos mapas interpolados nem sempre foi possível, principalmente em situações em que o solo apresentou-se com elevado teor de água ou bastante seco.

Os modelos de capacidade de suporte de carga do solo obtidos modelaram de forma satisfatória o comportamento da estrutura dos quatro tipos de solo

estudados, podendo auxiliar na predição de futuros carregamentos (pressões de contato) que deverão ser aplicados ao solo para que a sustentabilidade da sua estrutura não seja comprometida.

As pressões de preconsolidação puderam ser estimadas em função do índice de cone e se mostram como um excelente procedimento na localização e visualização de pontos ou zonas compactadas ou de elevada resistência mecânica, constituindo-se em um importante recurso para avaliar o impacto do tráfego agrícola sobre a estrutura de solos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V. I.; MORGAN, M. T.; SUMALI, H. Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n. 6, p. 1377-1383, 2001.

ALMEIDA, C. F. P. de; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Estimativa da distribuição espacial de retenção de água em um solo utilizando krigagem indicatriz**. Curitiba: Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná, 1996. 37 p. (Relatório técnico do laboratório de estatística).

ALIHAMSYAH, T.; HUMPHRIES, E. G. On the go mechanical impedance measurement In: Automated Agricultural for the 21st Century. Proceedings of the 1991. **ASAE Symposium ASAE**, St. Joseph, MI, USA, p. 300-306, 1991.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C.; PACHECO, E. B. Preparo do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n.147, p. 40-43, 1987.

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

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. In: **ASAE Standards 1999: standards engineering practices data**. 46.ed. St. Joseph. p. 991-3 (ASAE EP542).

ANDRADE, P.; ROSA, U.; UPADHYAYA, B.; JENKINS, B.; AGUERA, J.; JOSIAH, M. Soil profile force measurements using an instrumented trolley. **ASAE**. Annual International Meeting. 2001. Paper N.011060. St. Joseph, MI.

ANDRADE, P., UPADHYAYA, B., JENKINS, B., GARCIA FILHO, A. Evaluation of the U.C. Davis compaction profile sensor. **ASAE**. Annual International Meeting. 2002. Paper N.021185. Chicago, IL.

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

ASSIS, S. V. **Modelo para estimar o número de dias trabalháveis com trator agrícola, em função de parâmetros do solo e do clima**. 1988, 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola / Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 310 p.

BALASTREIRE, L. A.; AMARAL, J. R. Desenvolvimento e construção de um penetrógrafo eletrônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994, Campinas. **Separatas...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994. Separata n. 94-4-281.

BALBO, L. A. Colheita da cana crua. In: SEMINÁRIO DE COLHEITA MECÂNICA, 1, 1994, Ribeirão Preto, São Paulo. **Anais...** Ribeirão Preto, São Paulo. 1994, p.1-5.

BELTRAME, L. F. S. et al. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 145-149, 1981.

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

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 409-418, 1997.

BORGES, A. L. et al. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após cultivo com fruteiras perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 1019-1025, 1999.

BOWEN, J. E.; KRATKY, B. A. Compactación del suelo. **Agricultura de las Américas**, v. 6 p. 10-14, 1985.

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.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 315-331, 1980.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. S.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. S.; KARLEN, O. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in central lowa soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 58, n. 5. p. 1501-1511, 1994.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, S. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. 1ª Ed. Piracicaba-SP: Degaspari, 1997. 132p.

CAMPBELL, D. J. Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. In: SOANE, B.D. e VAN OUWERKERK. C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1994. p. 113-139.

CANARACHE, A.; TRANDAFIRESCU, T.; COLIBAS, I. HOROBEANU, I.; PATRU, V.; SIMOTA, H. e TRANDAFIRESCU, T. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in Romania. **Soil & Tillage Research**, v. 4, p. 199-213, 1984.

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

CAPPELLI, N. L.; DANIEL, L. A.; MIGUEL, M. A. Penetrômetro eletrônico para determinação do índice de cone de solos agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1995, Viçosa. **Separatas...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. Separata n. 363.

CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.; CAMPOS, R. F. Push cone eletrônico de baixo custo para estudo da resistência mecânica ao desenvolvimento radicular das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB. v. 5, n.3, p. 525-529, 2001.

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

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

CASAGRANDE, A. The determination of the precompression stress and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SOIL MECHANIC AND

FOUNDATION ENGINEERING. Cambridge, 1936. **Proceeding**. Cambridge: MA Harvard University, 1936. p. 60-64

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

COLETI, J. T.; DEMATTÊ, J. L. I. Compactação artificial em solos experiência e dados informativos. **Álcool e Açúcar**, v.2, n.6, p.34-39, set. / out. 1982.

CORSINI, P. C. **Problemas causados pela compactação dos solos**. STAB. Piracicaba-SP. v.11, n. 5, p 8-13, 1993.

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

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 2321-39, 1999.

CHANCELLOR, W. J. Compaction of soil agricultural equipment. **Bull. Div. Agric. Sci.** Univ. Calif., n. 1981, p. 1-53, 1977.

CHUKWU, E.; BOWERS, C. G. Instantaneous multiple depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. **ASAE Annual meeting**, 1999, Paper n. 993109.

CUNHA, A. R., KLOSOWSKI, E. S.; GALVANI, E.; ESCOBEDO J. F.; MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p. 487-491.

CROMER, M. V. Geoestatics for environmental and geotechnical applications: a technology transferred. In: SRIVASTAVA, R.M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V. et al. (Ed). **Geoestatics for environmental and geotechnical applications**. American Society for Testing and Materials. 1996, p. 3 -12.

DAVIS, J. G.; HOSSNER, L. R.; WILDING, L. P. et al. Variability of soil chemical properties in two sandy dunal soils of Niger. **Soil Science**, v. 159, n. 5, p. 321-330, 1995.

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

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

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p.175-182, 1996.

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

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. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 371-380, 1999.

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

DURUOHA, C. **Desenvolvimento do sistema radicular da Cana-De-Açúcar (*Saccharium Spp*) em função da compactação, do teor de água e do tipo de solo.** 2000. 115 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** EMBRAPA, 1999. Rio de Janeiro, CNPS, 1999.412 p.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n.1, p.13-21, 1997.

FAUNE, A. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, n. 2, p. 97-105, 1981.

FAULIN, G. Di C. **Variabilidade espacial do teor de água e sua influência na condutividade elétrica do solo.** Piracicaba/SP, 2005 Dissertação (Mestrado) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M. Efeito das rodas do trator em propriedades físicas de dois solos. **Revista Ceres**, v. 34, n.196, p. 562–568, 1987.

FISHER, R.A. Statistical methods for research workers. 13 ed. rev. New York: Hafner Publ. Inc., 1958.

GAMEDA, S.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; THERIAULT, R. A review of subsoil compaction and crop response. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL DYNAMICS, Auburn, Alabama, 1985. **Proceedings**. Auburn, USDA-ARS, 1985. v. 5, p. 970-978.

GASTON, L.A.; LOCKE, M.A.; ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Spatial variability of soil properties and weed population in the Mississippi delta. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 449-459, 2001.

GONÇALVES, A.C.A., MATA, J. D.V.; VIEIRA, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Variabilidade espacial de produtividade e de resistência à penetração em área irrigada, sob dois sistemas de preparo. In BALBUENA, R. H. et al. (Eds.). **Avances en el manejo del suelo y del agua en la ingeniería rural latinoamericana**. La Plata: Editorial de la U.N.L.P., 1998.

GONÇALVES, A.C.A., FOLEGATTI, M.V. & SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.155-164, 1999.

GONÇALVES, A.C.A. **Geoestatística aplicada ao estudo da variabilidade espacial em agroecossistemas**. Maringá: Universidade Federal de Maringá, 2000. 85 p.

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

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, Departamento de Produção Mineral, 1988. 145p.

GUIMARÃES, E. C., **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. Campinas, 2000. 89p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola/Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

HARRADINE, F. F. The variability of soil properties in relation to stage of profile development. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 14, p. 302-311, 1949.

HARRIS, W. L. The soil compaction process. In **COMPACTION OF AGRICULTURAL SOILS**. Michigan, **ASAE**, 1971. p. 9-43.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HENDRICK, J. G. Recording soil penetrometer. **Journal of Agricultural Engineering Research**. 14(2):183-186. 1969.

HILLEL, D. Introduction to soil physics. San Diego, Academic, 1982. 364p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERT, C. VAN. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69,

IMHOFF, S. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 104 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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

ISAAKS, H. E.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

KITAMURA, E. A. **Inter-relações da variabilidade especial da granulometria do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto**. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) - UNESP, Ilha Solteira, 2004.

KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:211-218, 1999.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos**. 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n.3, p. 395-398, 1995.

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

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, 1980.

LAMPARELLI, A. C.; ROCHA, J. V.; BROGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão; fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001, 118 p.

LANÇAS, K. P.; BENEZ, S. H.; FURLANI Jr, J. A.; GAMERO, C. A.; ANTUNIASSI, U. R. Subsolador: desgaste em função da sua dureza superficial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19. 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, SP., 1990.p. 801-809.

LANÇAS, K. P. **Desempenho operacional de pneus radiais em função da pressão de inflação, da lastragem e do deslizamento das rodas de tratores agrícolas.** 1996a. 170 f. Tese (Livre Docência em Mecânica Aplicada) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu.

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

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

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

MACHADO, R. V. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICO EM UMA **hidrosequência de solos bem a muito mal drenados**, 1994. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.

MAGALHÃES, P. S. G. Manejo de solo e seus efeitos sobre a compactação. In: SILVEIRA, G. M. da. (Ed). **IV ciclo de estudos sobre mecanização agrícola.** Jundaí: Fundação Cargil, 1990. p. 156-167.

MARSHALL, R. M., RANEY, W. A. **Modifying soil profiles.** In: POWER TO PRODUCE - THE YEARBOOK OF AGRICULTURE SOIL. Washington: United States Government. Printing Office, 1960. p. 123-128.

MANTOVANI, E. C. Compactação do Solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.17, p. 52-55, 1987.

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

MERCANTE, E. et al. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n.6, p.1149-1159, 2003.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo Adusp, 1980. 367 p.

MILAN, M. **Avaliação de desempenho de 4 modelos de pneumáticos agrícolas em solo de textura média**. 119 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

McNABB, D. H.; BOERSMA, L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n.2, p. 333-341, 1996.

MORETTIN, P. A.; BUSSAP, W. O. **Estatística básica**. 4 ed. São Paulo: Ed. Atual., 1987. 321 p.

NEGI, S. C.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E. The effect to compaction and minimum tillage on corn yields and soil properties. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, 23:744-7, 1990.

NESMITH, D. S.; RADCLIFFE, D. E.; HAFGROVE, W. L.; CLARK, R. L. e TOLLNER, E. W. Soil compaction in double wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society American Journal**, v. 51, p. 183-186, 1987.

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

OHU, J. O.; RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E.; MEHUYS, G. Shear strength prediction of compacted soil with varying organic matter content. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n.2, p.351- 355, 1988.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESK, D.V. S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, 2003.

O'SULLIVAN, M.F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, n.3/4, p. 257-269, 1992.

PEDROTTI, A.; VAHL, L. C.; PAULETTO, E. A. Níveis de compactação do planossolo e o desenvolvimento radicular de algumas culturas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 12. 1998. Fortaleza/Ceará. Resumos expandidos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Universidade Federal do Ceará. 1998. p. 89-90.

PRATHER, O. C.; HENDRICK, J. G.; SCHAFER, R. L. Na electronic hand-operated recording penetrometer. **Transactions of the ASAE**. 13(1): 385-386, 390. 1970.

RAGHAVAN, G. S. V.; McKYES, E.; STERMSHORN, E. Vehicle compaction pattern in clay soil. **Transaction of the ASAE**, v. 20, n.2, p. 218-220, 1977.

RAPER, R. L.; WASHINGTON, B. H.; JARRELL, J. D. A tractor-mounted multiple-probe soil cone penetrometer. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.15, n. 4, p.287-90, 1999.

RANEY, W. A.; EDMINSTER, T. W.; ALLAWAY, W. H. Current status of research in soil compction. **Soil Science Society American**. 79 (4)423 :-428. 1955.

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

ROHM, S. A. **Considerações sobre penetrômetros dinâmicos leves aplicados na construção e avaliação de pavimentos de baixo custo**. 1984. 109 p. Dissertação de mestrado EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos.

ROSSI, R. E; DUNGAN, J. L.; BECK, L. R. Kriging in the shadows: geoestatistical interpolation for remote sensing. **Remot sens. Environ**, v. 49, p. 32-40, 1994.

RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulics properties as stochastic processes: I. An analysis of field spatial variability. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, n.4, p. 682-687, 1981.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade de atributos do solo e de *crotalaria juncea* em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Cienciado Solo**, v. 22, n.1, p. 115-122, 1998.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E.; HERNANZ, J.L. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression test. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n.1/2, p. 37-50, 1998.

SALVADOR, N.; GRANATO, L. R. N. Avaliação de diferentes sistemas de manejo de restos culturais sobre à compactação do solo cultivado com milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, A Engenharia Agrícola- Tendências e Inovações. 1999, Pelotas, RS, **Anais...** Pelotas/RS, (CD ROM). 1999.

SEGANFREDO, M. L., ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 287-291, 1997.

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

SENE, M; VEPRASKAS, M. J; NADERMAN, G. C e DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 422-427, 1985.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P.; CAMARGO, O. A. Influencia da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 91-95, 1986.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. Piracicaba, 1988, 105 f. Tese (Doutorado) - ESALQ-USP, Piracicaba, 1988.

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

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

SILVA, M. L. L. et al. Melhoramento eletrônico e hidráulico de um penetrômetro para aplicação em laboratório e campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: UFLA/SBEA, 1998. v. 4, p. 409-411, 445 p.

SILVA, R. B. S.; LIMA J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito da absorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:219-226, 1999.

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

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

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

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SANTOS, F. L; FRANZ, C. A. B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23, 219-226. 2003.

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

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry**. San Francisco: Freeman, 1969.

SCHAFER, R. L.; JOHNSON, C. E.; KOOLEN, A. J. et al. Future research needs in soil compaction. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n. 6, p.1761-1770, Nov. / Dec. 1992.

SMITH, L. A.; DUMAS, W. T. A recorging soil penetrometer. **Transactions of the ASAE**. 21(1): 12-14,19. 1978.

SNEDECOR, G.W. e COCHARAN, W.G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames, Iowa State University Press, 1989. 503p.

STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. **Transactions of the ASAE**, v. 36, n.6, p.1713-1719, Nov. / Dec. 1993.

STOLF, R. et al. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar** - Stolf. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA – Planalsucar, 1983. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto – Boletim, 1)

STOLF, R. **A compactação do solo e perspectivas de subsolagem em citros**. Laranja, Cordeirópolis. n. 8, p. 283-308, 1987.

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

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**. 2001. 95 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Adv. Agron.**, v. 38, p. 45-94, 1985.

TAYLOR, H. M. **Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield**. In: BARNES, K. K.; CARLETON, W. M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R. I. e VANDENBERG, G. E. eds. *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 292-305.

TAYLOR, J. H.; BURT, E. C.; BAILEY, A. C. Radial tire performance in firm and soft soils. St Joseph: **ASAE**, 1979. 7p. (ASAE. Paper, 76-1036)

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22. p. 301-309, 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

UZUMAKI, E. T. **Geoestatística multivariada: estudo de métodos de predição**. 1994. 104 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - UNICAMP, Campinas, 1994.

VANDENBERG, G. E. Triaxial measurements of shear strain and compaction in insaturate soil. **Transactions of the ASAE**. v. 9, n.7, p. 460-463, 1966.

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

VAZ, C.M.P.; BASSOI, L.H. & HOPMANS, J.W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil & Tillage Research**, v. 60, p. 35-42, 2001.

VEENHOF, D.W.; MCBRIDE, R.A. Over consolidation in agricultural soils: **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 2, p.362-373, 1996.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45. p. 1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Instituto Agronômico de Campinas: IAC, 1997.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2000. p. 1-54.

VIACHESLAV, I.; ADAMCHUK, V. I.; MOLIN, J. P. Hastes instrumentadas para a mensuração da resistência mecânica do solo. **Eng. Agr.**, Jaboticabal, v. 26. n. 1, p. 161-169, jan. 2006.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the ASAE**. v. 4, p. 242-246, 1961.

VOORHEES, W.B.; SENST, G.G.; NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 344-349, 1987.

VOORHEES, W. B.; JOHNSON, J. F.; RANDALL, G. W. Corn growth and yield effected by surface and subsoil compaction in clay soil. **Agron. J.** v, 81, p. 294-303, 1989.

VOORHEES, W. B. Soil compaction: our newest natural resource. **Crops and Soils Magazine**, v. 29, n.5, p.13-15; n.6, p.7-10; n.7, p.11-13, 1977.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial **variability of soil physical properties in the field**. In: APPLICATIONS OF SOIL PHYSICS. New York, Academic Press, 1980. 385 p

WOLF, D.; HADAS, A. Soil compaction effects on cotton emergence. **Transactions of the ASAE**. v. 27, n. 3, p. 655-659, 1984.

WEAVER, H. A. Tractor use effects on volume weight of Davidson loam. **Agric. Eng.**, v.31, p.182-189, 1950.

WILLAT, S. T. Influence of aggregate size and water content on compactability of soil using short time static loads. **Journal Agriculture Research**. v. 37, p. 2107-115, 1987.

WILFORD, J. R.; WOOTEN, O. B.; FULGHAM, F. E. Tractor mounted field penetrometer. **Transactions of the ASAE**. 15(2): 226-227. 1972.

WU, L.; SWAN, J.B.; PAULSON, W.H.; RANDALL, G.W. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 17-33, 1992.

ZANIN, G.; BERTI, A.; RIELO, L. Incorporation of weed spatial variability into the weed control decision-marking process. **Weed Research**. v. 38, n. 2, p. 107-118, 1998.