

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

**MÉTODOS NÃO CONVENCIONAIS PARA AVALIAÇÃO DA  
POROSIDADE E DA DENSIDADE DO SOLO DE UM LATOSSOLO  
VERMELHO.**

**ANA PAULA ENCIDE**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de  
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em  
Agronomia, Área de Concentração Agricultura.

BOTUCATU - SP  
Janeiro - 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JOSÉ DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÔNOMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MÉTODOS NÃO CONVENCIONAIS PARA AVALIAÇÃO DA  
POROSIDADE E DA DENSIDADE DO SOLO DE UM LATOSSOLO  
VERMELHO.**

**ANA PAULA ENCIDE**

Orientadora Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. MARIA HELENA MORAES

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrônomicas da Unesp - Câmpus de  
Botucatu, para obtenção do título de Mestre em  
Agronomia, Área de Concentração Agricultura.

BOTUCATU SP  
Janeiro - 2005

*“Não existe um problema  
que não ofereça uma dádiva para você.  
Você procura os problemas porque  
precisa das dádivas por eles oferecidas.”*

*Richard Bach*

#### *DEDICO*

*Às pessoas mais importantes de minha vida,  
meus pais José e Maria, que estiveram ao meu lado em todos os  
momentos, obrigada pelo amor, confiança e incentivo.*

#### *OFEREÇO,*

*À minha irmã Andréia, ao meu sobrinho Vinícius e ao meu noivo  
Dácio pelo amor e carinho.*

## *AGRADECIMENTOS*

*À Deus, pela vida, saúde, proteção e capacidade.*

*À Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pela oportunidade;*

*À EMBRAPA/CNPQIA pelo apoio à realização deste trabalho, em especial a colaboração do pesquisador Dr. João de Mendonça Naime;*

*Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos;*

*À Prof. Dra. Maria Helena Moraes pela orientação, ensinamentos e amizade;*

*À Prof. Dra. Kátia Luciene Maltoni – UNESP/Ilha Solteira por suas sugestões e colaboração;*

*Ao Prof. Dr. Miguel Cooper – USP/ESALQ pelos conhecimentos passados;*

*Aos Docentes e Funcionários dos Departamentos de Produção Vegetal – Agricultura, Recursos Naturais - Ciência do Solo e Recursos Naturais – Ciências Ambientais pelo apoio e colaboração nesta pesquisa;*

*Aos funcionários da Biblioteca e Seção de Manutenção pelos serviços prestados;*

*Aos funcionários da Seção de Fotografia-Rubião Junior;*

*Aos amigos Adilson Pelá, Gláucia de Mello, Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa e Luiz Antônio de Mendonça Costa pela amizade;*

*Às amigas Meire de Andrade, Vanessa David Domingues, Cleusa Rosana de Jesus, Juana Villalba e Neiva Luciene Tragueta pela amizade e horas de alegria em nosso convívio;*

*Ao meu noivo e grande amigo Dácio Olibone por estar presente em todos os momentos, por seus ensinamentos, companherismo e carinho o meu muito obrigado;*

*Ao Engenheiro Agrônomo Nilton Marques de Oliveira pelo despertar da Agronomia;*

*Em memória Flávio Henrique Polaquini, agradeço a vida;*

*A todos que direta e indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho,*

*Meus sinceros agradecimentos!*

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>1. RESUMO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. SUMMARY.....</b>	<b>3</b>
<b>3. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>4. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
4.1- Matéria Orgânica do Solo x Sistemas de Manejo.....	8
4.2- Resistência à Penetração x Sistemas de Manejo.....	12
4.3- Densidade do Solo.....	14
4.3.1- Tomografia Computadorizada (TC).....	16
a) Funcionamento da Tomografia Computadorizada.....	16
b) Gerações de Tomógrafo.....	17
c) Raios X ou gama e suas interações com a matéria e atenuação de um feixe.....	19
d) Histórico da Tomografia Computadorizada em Ciência do Solo.....	20
e) Aplicação da Tomografia Computadorizada.....	20
4.3.2- Anel Volumétrico.....	23
4.4- Porosidade do Solo.....	24
4.4.1- Mesa de Tensão.....	26
4.4.2- Análise de Imagens de Blocos.....	27
<b>5.MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
5.1-Localização e Descrição da Área Experimental.....	30
5.2-Delineamento Experimental.....	31
5.3-Avaliações.....	32
5.3.1- Matéria Orgânica.....	32
5.3.2- Resistência do Solo à Penetração.....	32
5.3.3- Densidade do Solo.....	33
5.3.3.1- Método da Tomografia Computadorizada.....	33
5.3.3.2- Método do Anel volumétrico.....	37
5.3.4- Porosidade do Solo.....	38

5.3.4.1- Método da Mesa de Tensão.....	38
5.3.4.2- Análise de Imagens de Blocos.....	39
5.4- Análise Estatística.....	41
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>42</b>
6.1- Matéria Orgânica x Sistemas de Manejo.....	42
6.2- Resistência à Penetração do Solo x Sistemas de Manejo.....	44
6.3- Densidade do Solo.....	46
6.3.1- Tomografia Computadorizada.....	46
6.3.2- Anel Volumétrico.....	49
6.3.3- Tomografia Computadorizada x Anel Volumétrico.....	50
6.4- Porosidade do Solo.....	52
6.4.1- Mesa de Tensão.....	52
6.4.2- Análise de Imagens de Blocos.....	55
6.4.3- Mesa de Tensão x Análise de Imagens de Blocos.....	64
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE QUADROS

	<b>Página</b>
<b>Quadro 1.</b> Caracterização granulométrica e argila dispersa em água para tratamentos e camadas estudados.....	31
<b>Quadro 2.</b> Análise de variância para os teores de matéria orgânica.....	42
<b>Quadro 3.</b> Teores médios de matéria orgânica ( $\text{g.dm}^{-3}$ ) para os tratamentos estudados.....	43
<b>Quadro 4.</b> Análise de variância para os valores de resistência à penetração.....	44
<b>Quadro 5.</b> Valores médios de resistência à penetração (MPa) para os tratamentos e camadas estudados.....	45
<b>Quadro 6.</b> Valores médios de umidade do solo (%) para os tratamentos estudados.....	45
<b>Quadro 7.</b> Coeficiente de atenuação linear $-\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) e respectiva densidade do solo ( $\text{kg.dm}^{-3}$ ) para os tratamentos e camadas estudadas.....	47
<b>Quadro 8.</b> Análise de variância para os valores de densidade do solo obtidos por meio da tomografia computadorizada.....	47
<b>Quadro 9.</b> Densidade do solo obtida pela técnica da tomografia computadorizada para $\mu$ (coeficiente de atenuação linear) de cada tratamento.....	48
<b>Quadro 10.</b> Análise de variância para os valores de densidade do solo obtidos pela técnica do anel volumétrico.....	50
<b>Quadro 11.</b> Densidade do solo ( $\text{kg.dm}^{-3}$ ) pelo anel volumétrico para os tratamentos e camadas estudados.....	50
<b>Quadro 12.</b> Valores da densidade ( $\text{kg.dm}^{-3}$ ) do solo obtidos pelos métodos da tomografia computadorizada (TC) e do anel volumétrico (AV) para as camadas de solo estudadas e coeficiente de variação (CV).....	51
<b>Quadro 13.</b> Macroporosidade, microporosidade e porosidade total para os tratamentos e camadas estudados.....	52
<b>Quadro 14.</b> Análise de variância para os valores de macroporosidade microporosidade e porosidade total.....	53

<b>Quadro 15.</b> Desdobramento para a variável microporosidade (%).....	54
<b>Quadro 16.</b> Porcentagem de macroporos para os tratamentos e camadas estudados.....	55
<b>Quadro 17.</b> Análise da variância para macroporos obtidos pelo método análise de imagens de blocos.....	56
<b>Quadro 18.</b> Análise da variância para microporosidade obtida pelo método da mesa de tensão e análise de imagens de blocos.....	64
<b>Quadro 19.</b> Valores da microporosidade do solo (%) obtidos pelos métodos da análise de imagens e da mesa de tensão para as camadas de solo estudadas.....	65

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Movimentos de varredura na TC. A) Tomógrafo de primeira geração; B) Tomógrafo de segunda geração; C) e D) Tomógrafo de terceira geração...	18
<b>Figura 2.</b> Detalhe do local da fonte radioativa.....	19
<b>Figura 3.</b> Coleta com amostrador de PVC de 0-0,20 m no tratamento semeadura direta.....	33
<b>Figura 4.</b> Preparo da parafina (60°C) e amostra nos tubos de PVC com as extremidades parafinadas.....	34
<b>Figura 5.</b> Amostra sendo processada no tomógrafo de primeira geração.....	35
<b>Figura 6.</b> Representação da medida do coeficiente de atenuação em massa.....	36
<b>Figura 7.</b> Visualização de uma trincheira para coleta de anéis de aço nas camadas estudadas.....	37
<b>Figura 8.</b> Amostras volumétricas sendo saturadas.....	38
<b>Figura 9.</b> A) Mesa de tensão; B) Amostras volumétricas sendo processadas.....	39
<b>Figura 10.</b> Detalhe da trincheira para coleta do bloco de solo em sistema de semeadura direta.....	40
<b>Figura 11.</b> A) Impregnação da amostra com resina com auxílio de bomba a vácuo e dessecador. B) Detalhe do amostrador de aço usado em campo para a coleta e da amostra impregnada dentro da forma de alumínio.....	40
<b>Figura 12.</b> Resistência à penetração (MPa) para os tratamentos e camadas estudados.....	46
<b>Figura 13.</b> Imagens dos tratamentos através do Tomógrafo.....	49
<b>Figura 14.</b> Distribuição poral do tratamento Mata para camada 0-0,20 m; A) Imagem obtida com luz ultravioleta. B) Imagem binarizada onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.....	58
<b>Figura 15.</b> Detalhe das amostras do tratamento Mata em cada camada estudada. A1, A2, A3 e A4- imagens obtidas com luz ultravioleta; B1, B2, B3 e B4- imagens binarizadas onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.....	59

**Figura 16.** Distribuição poral do tratamento Preparo Convencional para camada de 0-0,20 m; C) Imagem obtida com luz ultravioleta. D) Imagem binarizada onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco..... 60

**Figura 17.** Detalhe das amostras do tratamento Preparo Convencional em cada camada estudada. C1, C2, C3 e C4- imagens obtidas com luz ultravioleta; D1, D2, D3 e D4- imagens binarizadas onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco..... 61

**Figura 18.** Distribuição poral do tratamento Semeadura Direta para camada de 0-0,20 m; E) Imagem obtida com luz ultravioleta. F) Imagem binarizada onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco..... 62

**Figura 19.** Detalhe das amostras do tratamento Semeadura Direta em cada camada estudada. E1, E2, E3 e E4- imagens obtidas com luz ultravioleta; F1, F2, F3 e F4- imagens binarizadas onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco..... 63

## 1. RESUMO

O objetivo deste trabalho foi comparar dois métodos de análise para densidade do solo (anel volumétrico e tomografia computadorizada) e dois métodos para porosidade (mesa de tensão e análise de imagens de blocos) em um LATOSSOLO VERMELHO.

A pesquisa foi conduzida na Fazenda Experimental Lageado-FCA/UNESP, Botucatu-SP. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com 4 repetições. Com exceção das imagens de blocos os demais dados foram submetidos ao teste F para análise de variância e ao teste de Tukey para a comparação de médias a 5% de probabilidade. As amostras foram coletadas na profundidade de 0-0,20 m em semeadura direta, sistema de preparo convencional e parcela com vegetação natural.

A densidade do solo determinada pelo método do anel volumétrico apresentou diferenças para os sistemas de semeadura direta e preparo convencional e o sistema mata, para as camadas de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10- 0,15 m. O método da tomografia computadorizada apresentou diferença para densidade do solo entre os sistemas de preparo convencional e vegetação natural e a semeadura direta, para a camada de 0-0,20 m. O método do anel volumétrico superestimou os valores de densidade, nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10

m, comparado com o método da tomografia computadorizada, cujos resultados foram coerentes como os de resistência à penetração. O coeficiente de variação relativo aos valores de densidade do solo foram menores para o método da tomografia computadorizada em comparação com o método do anel volumétrico. O método da mesa de tensão não apresentou diferenças significativas para macroporosidade para os sistemas de manejo. O método de análise de imagens evidenciou diferenças entre a semeadura direta e vegetação natural e preparo convencional.

---

**Palavras-chave:** tomografia computadorizada, análise de imagens, densidade do solo, porosidade, sistema de manejo.

**NO CONVENTIONAL METHODS FOR EVALUATION OF POROSITY AND DENSITY OF A RED LATOSOL (Orthox).** Botucatu, 2005. 78fl. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ANA PAULA ENCIDE

Adviser: MARIA HELENA MORAES

## **2. SUMMARY**

The objective of this research was to compare two methods for soil density (core sampling and computed tomography) and two methods for porosity (tension column and blocks image analysis) measured in a red latosol (Orthox). The experiment was carried out in Lageado Experimental Farm, FCA/UNESP in Botucatu city, State of São Paulo in a randomized block design with four replicates. With exception of the blocks image analysis, data were submitted to test F for variance analysis and Tukey test for the means comparison with 5% of probability. The samples were collected in layers of 0-0.20m of profundity under no tillage, conventional tillage and natural vegetation systems. Core sampling method resulted in difference in the soil density among the systems of no tillage, conventional tillage and natural vegetation for the layers of 0-0.05; 0.05-0.10 and 0.10-0.15m. The computed tomography method showed difference in the soil density between conventional tillage, natural vegetation and no tillage system for the layer of 0-0.20m. The core sampling method overestimated the values of soil density, in the layers of 0-0.05 and 0.05-0.10m, considering that the results obtained through computed tomography method whose results were coherent with the soil penetration resistance ones. The variation coefficient related to the values of soil density was smaller for the method of the computed tomography

related to the core sampling method. Tension table method didn't result in macro porosity difference among the tillage systems. Blocks image analysis method evidenced difference among the systems of no tillage, natural vegetation and conventional tillage.

---

Keywords: computed tomography, blocks image analysis, soil density, porosity, management systems.

### **3. INTRODUÇÃO**

A agricultura, com a finalidade de obter frutos e grãos para a alimentação humana, surgiu 8000 a.C, na Mesopotâmia. Durante décadas, o homem em busca de seu bem estar e aumento de rendimento, nas operações de trabalho na propriedade, estudou e desenvolveu diferentes equipamentos de preparo do solo. Atualmente as operações de preparo do solo podem, no todo ou em parte, ser mecanizadas com alta eficiência e qualidade de trabalho.

O aumento da população mundial contribuiu muito para o uso contínuo de máquinas e equipamentos de preparo de solo, no entanto, o uso indiscriminado vem acarretando sérios problemas ao solo, afetando inclusive fauna e flora. Neste sentido muitos trabalhos foram e continuam sendo desenvolvidos com o objetivo de diminuir os distúrbios causados pelos diferentes sistemas de manejo do solo.

Estes distúrbios dos solos tornam-se claros quando sua produtividade diminui mesmo sob condições supostamente favoráveis, como adubação e irrigação. No entanto, as condições físicas do solo estão em desequilíbrio, quando isso ocorre várias estratégias podem ser definidas para detectar exatamente o problema, estando as análises físicas do solo, via de regra, incluídas neste processo.

Atualmente, algumas análises são realizadas como rotina para o produtor, no entanto existem métodos mais recentes e precisos para identificar alterações nas propriedades físicas do solo, sendo estes muitas vezes mais próximos da realidade em campo do que os rotineiramente utilizados.

A seleção do método mais adequado para diagnosticar as condições do solo, encontradas em campo, cabe aos pesquisadores e/ou profissionais da área, que utilizam, normalmente, mais de uma forma de verificação das mudanças estruturais, por exemplo, ocorridas em solos sob cultivo para definir as estratégias de preservação, se necessário.

Sabe-se que os diferentes manejos do solo alteram as propriedades deste, principalmente as físicas, necessitando de acompanhamento rotineiro, prático e de precisão para se diagnosticar as mudanças ocorridas no solo, possibilitando a prevenção de danos futuros.

Métodos como tomografia computadorizada, micromorfologia e a análise de blocos, não visam substituir nenhuma outra forma de análise, mas podem contribuir ao meio científico, gerando dados mais precisos e próximos da realidade em campo.

Dentro deste contexto objetivou-se com este trabalho comparar os métodos da tomografia computadorizada e anel volumétrico e da mesa de tensão e análise de blocos, respectivamente, para avaliação da densidade e da porosidade do solo em um LATOSSOLO VERMELHO, sob diferentes sistemas de manejo.

#### **4. REVISÃO DE LITERATURA**

Para que as técnicas de manejo utilizadas por agricultores alcancem um bom desempenho, muitos estudos devem ser realizados ao longo do tempo. Estes estudos podem ser desenvolvidos por instituições de ensino e empresas privadas. Após muitos experimentos em campo e trabalhos de laboratório algumas descobertas chegam aos produtores, beneficiando-os em diversas situações do cotidiano.

Com o intuito de auxiliar no aperfeiçoamento da agricultura menos prejudicial ao meio ambiente, metodologias precisam ser elaboradas e as já existentes avaliadas de maneira a se adequarem a cada realidade.

Na física de solo as análises de densidade, resistência à penetração, porosidade do solo, entre outras, apresentam-se como importantes ferramentas de trabalho para pesquisadores, uma vez que detectam condições que o olho humano não consegue observar e nem mesmo quantificar. Os resultados destas análises informam como o solo se comporta de acordo com os sistemas de manejo e semeadura adotados, podendo, quando antecipadamente determinadas, sanar problemas que influenciam o rendimento das culturas e beneficiam a conservação dos solos.

Apesar da significativa contribuição das técnicas convencionais para avaliação das características físicas do solo, tais mecanismos apresentam limitações, fazendo com que novas técnicas sejam utilizadas.

#### **4.1- Matéria Orgânica do Solo x Sistemas de Manejo**

Segundo Wohlenberg et al. (2004), a influência da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico, sendo necessário o acréscimo contínuo de material orgânico para manter a estrutura adequada ao desenvolvimento das plantas.

Quando o homem altera o equilíbrio do ecossistema, ocorrem mudanças na dinâmica da matéria orgânica e os efeitos dessa perturbação são, geralmente, negativos para as propriedades do solo. No manejo conservacionista a rotação de cultura, por exemplo, aliada ao manejo correto do solo, faz com que este seja biologicamente mais ativo e apresente maior potencial produtivo. Esse efeito se deve à conjunção de fatores como, entre outros, proteção do solo mediante cobertura viva ou morta, maior retenção de água, efeito rizosférico das culturas, maior disponibilidade de matéria orgânica e melhores condições físicas, químicas e biológicas do solo (CATTELAN et al., 1997).

Dentre as características químicas afetadas pela matéria orgânica destacam-se a disponibilidade de nutrientes para as culturas, a capacidade de troca de cátions e a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, fundamentais em solos tropicais que são em sua maioria bastante intemperizados e ácidos (SANTOS & CAMARGO, 1999).

Segundo Lal (1991) para aumentar a produção das plantas, os sistemas de preparo deverão facilitar a conservação do solo e da água, estimular o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, manter favoráveis a matéria orgânica no solo e reverter as tendências degradativas das propriedades e dos processos do solo. O sistema de preparo inclui, de acordo ASAE (1982), a manipulação mecânica do solo pela ação dos órgãos ativos, com o objetivo de dar condições mínimas para o desenvolvimento e produção das culturas nele implantadas.

A estrutura do solo, que determina a magnitude e a distribuição do espaço poroso, é um parâmetro do solo favoravelmente afetado pela matéria orgânica.

O material orgânico sem transformação biológica tem pequeno, ou nenhum, efeito na estrutura do solo. Os microrganismos sem matéria orgânica como fonte de energia são ineficientes quanto à agregação do solo. A atividade microbiológica intensa, conseqüente à incorporação de matéria orgânica ao solo, está associada com processos metabólicos de degradação e síntese. A soma desses efeitos resulta na formação de agregados estáveis no solo. Essa estabilidade é resultado da cimentação gerada pelos produtos sintetizados por organismos ou pela ação estabilizadora dos produtos da decomposição, atuando individualmente ou em conjunto (KALPAGÉ, 1976).

A matéria orgânica do solo pode ser dividida em dois grupos fundamentais. O primeiro é constituído pelos produtos da decomposição de resíduos orgânicos e do metabolismo microbiano, como proteínas e aminoácidos, carboidratos simples e complexos, resinas, ligninas e outros. Essas macromoléculas constituem aproximadamente 10 a 15% da reserva total do carbono orgânico nos solos minerais. O segundo grupo é representado pelas substâncias húmicas propriamente ditas, constituindo 85 a 90% da reserva total do carbono orgânico (ANDREUX, 1996).

De acordo com Kiehl (1985), a incorporação da matéria orgânica nos solos, na forma de esterco animal ou de compostos orgânicos, aumenta a capacidade de troca catiônica e proporciona a melhoria na estrutura, caracterizada pela diminuição da densidade do solo, aumento da porosidade e da taxa de infiltração de água, além de aumentar direta e indiretamente a capacidade do solo de armazenar água. A temperatura do solo também é influenciada pela matéria orgânica. Solos escuros, ricos em húmus, absorvem mais calor que os claros, sendo o húmus o que tem maior calor específico e a areia o menor.

As minhocas atuam no processo de vermicompostagem e também no solo digerindo a matéria orgânica e provocando sua degradação. Do processo resultam os coprólitos (agregados de solo e matéria orgânica digerida), material em estado avançado de decomposição e com maior concentração de nutrientes (KIEHL, 1985).

O uso de culturas susceptíveis à melhoria do estoque orgânico no solo vem aumentando a cada ano, nas pesquisas desenvolvidas. As pastagens cultivadas aparecem como alternativa com forte potencial de armazenamento de C (ALBRECHT et al., 1992; FEIGE et al., 1995) e para as culturas anuais, grande interesse tem sido consagrado aos sistemas de manejo que utilizam o cultivo mínimo do solo (BEARE et al., 1994).

Freitas et al. (2000), estudando níveis e natureza do estoque orgânico de Latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo, observaram que o sistema de plantio direto possibilita maior estocagem de C no compartimento resíduos vegetais, em comparação com o sistema convencional e que os Latossolos argilosos da região do cerrado apresentam pouca variação dos estoques orgânicos na camada de 0-0,20 m, mesmo que as variações da fração dos resíduos vegetais sejam fracas, estas funcionam como um indicativo da evolução dos estoques orgânicos nos solos.

Os restos vegetais que permanecem no solo após a colheita têm menor taxa de mineralização no sistema plantio direto, esta associada a maiores adições de carbono e nitrogênio, eleva seus teores no solo (BAYER et al., 1995), comparativamente ao sistema convencional. Com isso, aumenta a atividade biológica, resultando no incremento de substâncias húmicas, especialmente ácidos húmicos e fúlvicos (CERETA, 1995), que podem influenciar algumas propriedades físico-químicas, como a capacidade de troca de cátions e as formas de fósforo.

Santos & Camargo (1999) observaram que a principal característica física do solo afetada pela matéria orgânica é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas outras características físicas do solo como a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo.

Determinações realizadas por Vieira (1981), em cultura de soja, mostraram que o solo sob plantio direto pode conter até 15% a mais de umidade que o convencional, na profundidade de 0-0,05 m, em períodos de estiagem. Sidiras et al. (1982) determinaram no plantio convencional um déficit hídrico de 23%, durante veranico na cultura de soja, enquanto o plantio direto apresentou 20% de água disponível às plantas na camada de 0-0,10 m de profundidade.

Sob vegetação natural, o conteúdo de matéria orgânica do solo encontra-se estável. O uso agrícola altera esse conteúdo, sendo observada uma redução acentuada quando utilizados métodos de preparo com intenso revolvimento do solo e sistemas de cultura com baixa adição de resíduos vegetais. Nessa situação, é estabelecido um sistema de degradação das condições físicas, químicas e biológicas do solo, além da perda da produtividade das culturas (BAYER & MIELNICZUK, 1999).

Silva & Mielniczuk (1997) comentam que o uso agrícola e a utilização intensiva do solo, com sistemas de cultivo inadequados, contribuem para a degradação das propriedades do solo, ocorrendo diminuição da estabilidade em água, destruição dos agregados naturais e das unidades estruturais, como conseqüência da redução no conteúdo de matéria orgânica e da compactação pelo tráfego de máquinas agrícolas.

No caso do sistema de semeadura direta, que é um sistema caracterizado pela não mobilização das camadas, ocorre manutenção da palhada em superfície, que protege o solo da radiação solar, do impacto das gotas de chuva e aumenta o teor de matéria orgânica, principalmente, contrapondo com o sistema de preparo de solo convencional, onde são realizadas operações de preparo que visam a desestruturação do solo a ser semeado, resultando em camadas compactadas na profundidade de trabalho do implemento, maiores temperaturas do solo devido à ausência de cobertura vegetal, entre outros fatores (SILVA & MIELNICZUK, 1997).

Segundo Costa et al. (2004) o não revolvimento do solo e a adição dos resíduos das culturas em sua superfície desencadeiam inúmeros processos físicos, químicos e biológicos que levam ao aumento da estabilidade dos agregados e dos estoques de matéria orgânica no solo. Os maiores conteúdos de carbono orgânico determinam maior estabilidade de agregados, e esta por sua vez, maior proteção física da matéria orgânica. Por outro lado, a quebra dos agregados do solo ocorrida no preparo convencional expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico presente.

Os sistemas de manejo acarretam mudanças nos teores de matéria orgânica do solo. Os solos cultivados apresentam, normalmente, teores de matéria orgânica inferiores aos dos solos sob vegetação natural. As perdas de matéria orgânica nos solos cultivados ocorrem pela oxidação dos compostos orgânicos e pelo arraste da camada superficial do solo pela erosão hídrica (DE MARIA, 1999).

Pode-se considerar, portanto, que a matéria orgânica é à base dos solos, pois ela tanto influencia as propriedades físicas como as químicas do solo, que o capacitam para fornecer condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas resultando em melhores produções.

#### **4.2- Resistência do Solo à Penetração x Sistemas de Manejo**

Apesar de muitas limitações a resistência do solo à penetração é frequentemente utilizada como uma indicação comparativa de compactação, devido a facilidade e rapidez, com que numerosas medidas podem ser feitas. O solo pode ser considerado compactado quando a proporção do volume total de poros para o volume total do solo é inadequada para o máximo desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente no campo.

Qualquer alteração significativa na estrutura dos solos afeta a disponibilidade de água, difusão de O<sub>2</sub> e a resistência do solo à penetração. Uma condição estrutural do solo ideal deveria possibilitar uma grande área de contato raiz-solo, suficiente espaço poroso para o movimento de água e gases e níveis não impeditivos de resistência do solo à penetração das raízes (SILVA, 2002).

Segundo Silva (2002) as propriedades físicas do solo atuam direta ou indiretamente no crescimento das plantas, as de influência direta estabelecem os processos fisiológicos e bioquímicos que controlam o crescimento das plantas: a disponibilidade de água, a difusão de oxigênio no solo e a resistência do solo à penetração. Já as de influência indireta são densidade do solo, condutividade hidráulica, agregação, entre outras.

Idealmente, as condições físicas do solo deveriam ser quantificadas por meio de parâmetros que integrem as variações nas propriedades físicas do solo que influenciam o crescimento das plantas. Neste contexto, a umidade do solo desempenha um papel fundamental.

A resistência oferecida pelo solo à penetração de raízes, como o próprio nome sugere, é um índice que quantifica a resistência mecânica do solo à deformação imposta pelo crescimento de raízes ou introdução de um penetrômetro. A resistência mecânica do solo é fortemente dependente da umidade do solo, aumentando exponencialmente com o decréscimo na umidade. Isto ocorre porque, à medida que o solo seca as forças de coesão se tornam maiores, havendo concentração dos agentes cimentantes na solução do solo, além da redução do efeito lubrificante da água. A resistência à penetração que causa limitações severas ao crescimento de plantas é variável com a cultura, porém encontrou-se uma boa correlação

entre a resistência à penetração de 2 MPa e reduções severas ao crescimento de raízes (SILVA et al. 2000).

Solo com resistência a penetração variando de 1 a 3,5 MPa poderá restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes, sendo essa restrição também afetada pela estrutura do solo (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999).

Pode ocorrer da resistência à penetração superar os 2 MPa em umidades maiores do que o ponto de murcha permanente, nestas condições, se estabelece um novo limite inferior de umidade do solo para o crescimento de plantas, a umidade do solo em que a resistência à penetração é maior ou igual a 2 MPa (SILVA, 2002).

O teor de umidade do solo tem grande influência no processo de compactação. Geralmente o valor máximo de compactação está sempre próximo ao teor de umidade correspondente à capacidade de campo. É interessante que se obtenha uma curva de compactação para cada tipo de solo e que se evite o trabalho com máquinas próximo a este ponto ótimo de umidade (MANTOVANI, 2002).

Tavares Filho et al. (2001), avaliando a resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular sob diferentes sistemas de manejo em um LATOSSOLO ROXO, verificaram que os valores de resistência do solo à penetração no plantio direto foram mais afetados pela distribuição estrutural do que pela umidade do solo.

Uma outra variável a ser considerada no processo de compactação é a textura do solo. Os solos cuja constituição apresentam partículas do mesmo tamanho são menos susceptíveis ao processo de compactação, comparados aos solos onde há mistura uniforme de argila, silte e areia. Isto se deve ao fato de que as partículas de tamanho diferentes se arranjam e preenchem os poros, quando submetidos a uma pressão no solo.

Para a maioria dos solos, a densidade de partículas tem um valor variando de 2,55 a 2,70 g.cm<sup>-3</sup> e quando informações mais específicas não são conhecidas ou disponíveis, pode-se assumir 2,65 g.cm<sup>-3</sup> (TAVARES FILHO et al., 2001).

Uma evidência da influência da estrutura do solo na definição das condições físicas para o desenvolvimento radicular é que um solo deve apresentar acima de 10 % de porosidade de aeração para oferecer condições favoráveis ao bom desenvolvimento radicular das plantas e as culturas podem apresentar crescimento radicular em diferentes valores de resistência crítica (METERECHERA et al., 1991).

Porosidade é o termo de maior significado para se usar na discussão de compactação do solo, pois descreve diretamente a proporção, em volume, do solo disponível para raízes das plantas e a água e ar que elas requerem.

Para Pedrotti et al. (2001) o preparo do solo, além de propiciar melhores condições de semeadura, visa controlar plantas daninhas, pragas e doenças e melhorar as condições físicas do solo, buscando maior infiltração de água e aeração, além de reduzir a resistência mecânica do solo à penetração. Porém, quando o cultivo é inadequado e intenso a estrutura é deteriorada (diminui porosidade, condutividade hidráulica e permeabilidade) pelo aumento da resistência à penetração e consequente aumento da densidade do solo.

Quando o solo alcança o teor de umidade da capacidade de campo, há considerável variabilidade na relação entre resistência à penetração e a densidade do solo.

Silva et al. (2000), avaliando a suscetibilidade à compactação, verificaram que as deformações ocorridas no Podzólico Vermelho-Amarelo e no Latossolo Vermelho-Escuro são diferentes em amplitudes, dependendo do estado inicial de compactação, grau de saturação e pressão aplicada ao solo.

A relação entre resistência do solo e densidade do solo varia de solo para solo e, para um determinado solo, com o teor de umidade. Mesmo quando o teor de umidade é usado, a relação das leituras do penetrômetro e densidade do solo podem ser diferentes em um solo compactado em condições de campo.

### **4.3- Densidade do Solo**

Segundo Freitas (2000), a compactação do solo é considerada a maior limitação à produção de culturas em todo o mundo, pois esta afeta diretamente o crescimento das raízes, diminui a capacidade de infiltração de água no solo, reduz a translocação de nutrientes, resultando em uma pequena camada a ser explorada pelas raízes.

Por depender de vários fatores, principalmente da umidade do solo no momento de crescimento das raízes, o efeito da compactação na produção das culturas é difícil de ser observado. Da mesma forma, é muito difícil se estabelecer valores limite para

densidade, porosidade, penetrabilidade, infiltração, etc., pois estes dependem das condições presentes em cada local ou gleba (FREITAS, 2000).

Segundo Mantovani (2002), o volume de poros destruídos no solo por um equipamento agrícola, devido à compactação, é igual ao volume do sulco produzido pelo equipamento. O volume total de um solo é constituído do volume de partículas e do volume de poros entre as partículas. O volume de um poro é ocupado com água e/ou ar. Assim diz-se que, o solo está compactado quando a proporção do volume total de poros para o volume total do solo é inadequada para o máximo desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente.

Poros maiores geralmente são ocupados por ar, e poros menores por água. O melhor método direto para determinar a compactação do solo é o da densidade do solo. A densidade do solo é o peso do solo seco, por unidade de volume total do solo, expressa em gramas por centímetros cúbicos.

A densidade do solo é uma propriedade física influenciada por cultivos que alteram a estrutura e, por conseqüência, o arranjo e o volume de poros. Essas alterações modificam propriedades físico-hídricas importantes, tais como porosidade de aeração, retenção de água no solo, disponibilidade de água às plantas e resistência do solo à penetração (TORMENA et al., 1998).

Costa et al. (2003) encontraram incrementos na densidade do solo quando sob preparo convencional, mesmo ao adotarem práticas mitigadoras do processo de degradação física do mesmo, enquanto em sistemas de semeadura direta houve incremento da densidade do solo na profundidade de 0-0,05 m e redução da densidade nas demais profundidades. O aumento verificado na superfície deve-se ao trânsito de máquinas e/ ou adensamento natural do solo. A redução da densidade em subsuperfície indica uma melhoria na qualidade física do solo, decorrente da atividade da fauna edáfica e da presença de raízes, que atuam na formação de canais (bioporos).

De acordo com Beltrame & Taylor (1980), as causas das alterações na densidade dos solos podem, por vezes, ser naturais, difíceis de definir e avaliar e agem lentamente no solo, como, por exemplo, a eluviação de argilas.

### 4.3.1- Tomografia Computadorizada (TC)

#### a) Funcionamento da tomografia computadorizada

Tomografia Computadorizada é o processo utilizado para se obter uma imagem bidimensional ou tridimensional de uma amostra em seção transversal, por meio de uma série de projeções unidimensionais, obtidas a partir dessa mesma amostra. A tomografia de transmissão utiliza um feixe colimado de radiação, onde a união dos vários feixes colimados paralelos define um plano vertical, tão fino quanto o próprio feixe. A radiação útil não incide diretamente sobre um filme, como na radiografia convencional, mas informações relacionadas à radiação para diversas orientações angulares são convertidas em sinais elétricos, que são posteriormente digitalizados, processados e armazenados em computador. A informação processada e armazenada, após o uso de algoritmos reconstrutivos, fará parte de uma matriz imagem, onde cada pixel representa, para tomografias de raios X ou gama ( $\gamma$ ), a função coeficiente de atenuação linear utilizada para o cálculo da densidade (MACEDO et al., 1996).

Assim, segundo Naime (1994), TC é o processo de obtenção reconstruída da seção transversal ou fatia de um corpo, utilizando-se um equipamento externo ao mesmo. Este processo ocorre através de múltiplas projeções obtidas de quaisquer radiações, dentre as quais raios X, raios gama e ondas ultra-sônicas, ou partículas, com energia suficiente para passar através do corpo de interesse.

Um feixe de raios X ou gama, ao atravessar uma amostra homogênea, é atenuado segundo a equação de Lambert-Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde,

$I_0$  é o número de fótons incidentes;

$I$  é o número de fótons que atravessam a amostra;

$\mu$  é o coeficiente de atenuação linear e

$x$  é a espessura da amostra.

No processo de aquisição de dados, o que se mede, em uma TC, são os feixes incidentes e emergentes ( $I_0$  e  $I$ , respectivamente). Uma série de varreduras, em ângulos diferentes é realizada e para cada ângulo, tem-se um perfil de raios-soma, chamado de projeções. Através da aplicação de transformações de Fourier ao conjunto de dados adquiridos, consegue-se obter os vários valores de  $\mu$  na secção em análise (MACEDO et al., 1996).

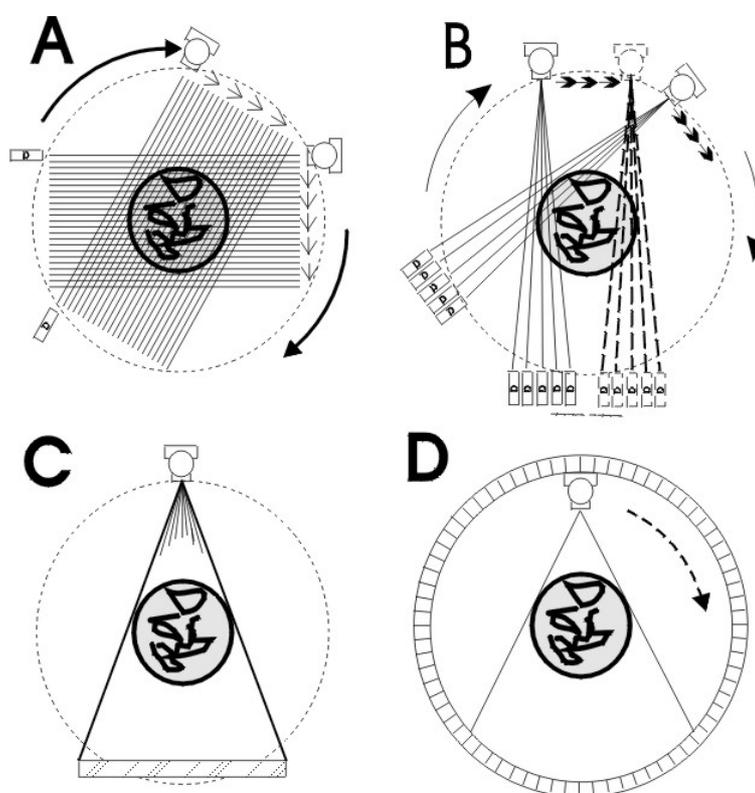
### **b) Gerações de tomógrafos**

Os tomógrafos estão classificados em 5 gerações, de acordo com o tipo de varredura empregado (MACEDO et al., 2001)

Nos tomógrafos de primeira geração (Figura 1 A), um feixe de raios X é colimado para se obter um feixe fino. Após atravessar a amostra, os fótons incidem sobre um detector para bloquear a radiação espalhada. O equipamento translada-se em relação à amostra, fazendo paradas espaçadas de deslocamentos denominados passos lineares. A contabilização dos fótons é feita nestas paradas, durante um tempo de amostragem. Concluída uma translação, o equipamento é rotacionado de um deslocamento angular denominado passo angular e nova varredura é feita. O processo se repete até que se complete um ângulo total de  $180^\circ$ . O tempo para aquisição dos dados varia de alguns minutos a algumas horas.

Para os tomógrafos de segunda geração o detector é substituído por um arranjo de  $N_d$  detectores e por um feixe leque. O número de translações reduz-se a  $N/N_d$  e o tempo varia de 20 a 5s (Figura 1 B).

Na Figura 1 C, é apresentado o movimento de varredura dos tomógrafos de terceira geração usando um feixe em leque, uma série de detectores e apenas movimento de rotação da fonte e detector, possuindo uma quantidade tal de detectores, alinhados em arco (Figura 1 D), que não é necessária nenhuma translação e o tempo de aquisição dos dados é de segundos.



**Figura 1:** Movimentos de varredura na TC. A) Tomógrafo de primeira geração; B) Tomógrafo de segunda geração; C) e D) Tomógrafo de terceira geração.

Os tomógrafos de quarta geração possuem grande número de detectores alinhados em anel e apenas o detector se movimenta e apresentam tempo de varredura de segundos.

Para que não ocorra a degradação da imagem é necessário um aparelho sem parte móvel. Caso dos tomógrafos de quinta geração, onde um canhão de elétrons gera raios X em várias direções, fazendo uma varredura sobre um alvo côncavo. O tempo de aquisição é de alguns milissegundos (HENDEE, 1995).

A matriz de dados obtida é transformada numa matriz imagem por meio de algoritmos de reconstrução. A imagem construída é um mapa de coeficientes de atenuação lineares de uma seção transversal do objeto, ou seja, uma fatia deste. A espessura desta fatia depende da espessura do feixe de radiação, que é definida pela abertura no colimador, situada à frente do detector (VAZ, 1989).

A área de cada elemento da imagem é chamada de PIXEL, que multiplicado pela espessura da seção transversal, define um VOXEL, que é um elemento de volume. Para materiais porosos, como o solo, a tomografia depende da densidade do objeto e da umidade, uma vez fixada a energia e o número atômico. Sendo assim, o valor numérico de cada PIXEL da imagem de uma determinada amostra de solo, varia com a densidade e a umidade deste (VAZ, 1989).

### c) Raios X ou gama e suas interações com a matéria e atenuação de um feixe

O tomógrafo de segunda geração tem como fonte de raios gama o elemento  $^{137}\text{Césio}$ , cuja radiação é uma onda eletromagnética ionizante (Figura 2). De acordo com a literatura, mediante processo natural ou artificial pode ocorrer um desarranjo na estrutura do núcleo de um átomo tornando-se este átomo excitado. Na volta a uma configuração estável ocorre um processo de desexcitações nucleares. Um desses processos é chamado de desexcitação gama, ou seja, a emissão de radiação gama pelo núcleo, porém trata-se de uma desexcitação secundária, uma vez que ocorre após algum processo, como a emissão de partículas  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ , a captura eletrônica e outros. A energia da radiação gama possui um valor único (monoenergética) e pôr ser uma radiação eletromagnética de energia relativamente alta, os raios gama têm alto poder de penetração num meio, se comparado com partículas  $\alpha$ ,  $\beta^+$  e  $\beta^-$  (Naime, 1994).



**Figura 2.** Detalhe do local da fonte radioativa.

De acordo com Vaz (1989) durante a interação da radiação gama (fótons) com a matéria de um meio ocorrem vários fenômenos de transferência de energia. Os processos de interação da radiação com a matéria dependem da sua energia e do número atômico do material. Um feixe de raios gama ao passar por um material, sofre uma atenuação, ou seja, parte dos fótons passa sem interagir e outra parte transfere total ou parcialmente sua energia à matéria, isto é, são absorvidos.

#### **d) Histórico da tomografia computadorizada em ciência do solo**

No fim da década de 60 e início de 70 vários pesquisadores exploravam a reconstrução tomográfica na área médica. Em 1972 a tomografia alcançou grande avanço e daí se chegou aos equipamentos sofisticados, rápidos e seguros, tornando-se uma técnica muito útil e difundida atualmente.

Mas o primeiro trabalho de aplicação técnica da reconstrução tomográfica por transmissão de radiação em Ciência do Solo surgiu com Petrovic et al., (1982), que usaram a TC para determinar a distribuição espacial das densidades de amostras de solo com um tomógrafo médico. Hainsworth & Aylmore (1983) concluíram que a TC é uma técnica potente para se estudar o sistema solo-água-plantas, estudando mudanças espaciais no conteúdo de água no solo, no entanto nenhum desses autores chegou a uma calibração de unidade. No entanto, Crestana et al. (1985) mostraram ser possível medir a umidade do solo e o movimento da água neste meio em três dimensões, além de calibrarem o tomógrafo em termos de números Hounsfield versus umidade e densidade.

#### **e) Aplicação da tomografia computadorizada**

Devido a não invisibilidade das amostras, aliado às resoluções alcançadas a tomografia computadorizada de raios-X, raios gama e RMN (ressonância magnética nuclear) fornece imagens de seções transversais de objetos opacos, tendo uma boa repercussão. A tomografia computadorizada por RMN, entretanto, possui fortes restrições para seu uso em meios porosos contendo materiais paramagnéticos, conforme comprovado por CRESTANA & NIELSEN (1990), citado por Macedo et al. (2001), além de ser difícil ou

impossível quantificar os resultados através da correlação do sinal de RMN e o conteúdo de água, por exemplo.

Segundo Macedo et al. (2001), a tomografia computadorizada por raios-X ou gama, não sofre as restrições acima, podendo ser usada na presença de materiais paramagnéticos, bem como se efetuarem calibrações, correlacionando os coeficientes de atenuação com valores de densidade e umidade. Esta técnica recente de análise de imagem, para estudos não invasivos, bi e tridimensionais de processos multifásicos presentes em meios porosos, pode ter resolução na escala milimétrica ou micrométrica. O tomógrafo computadorizado fornece imagens através da transmissão de radiação, de seções transversais de amostras de solo, com precisão de milímetros. Esta imagem é uma matriz de coeficientes de atenuação linear, que podem ser correlacionados com a densidade do solo, por meio de calibração para cada solo. Nestes aparelhos o tempo para aquisição dos dados varia de alguns segundos há algumas horas, dependendo da geração do aparelho e do tamanho da amostra.

Alguns processos que ocorrem no solo como a compactação, penetração de raízes, encrostamento, ciclos de umedecimento e secagem, deslocamento miscível e imiscível de nutrientes na presença de raízes e fluxo preferencial de poluentes em solos fraturados, podem ser analisados com o auxílio da TC, segundo Crestana et al., (1996).

Vaz et al., (1992), avaliando a compactação de solos por TC, concluíram que para o limite de baixas umidades a água tem a função de facilitar a transmissão das pressões, esta facilidade de transmissão aumenta com a elevação da umidade, ou seja, os poros começam a saturar e a umidade favorece a compactação até o momento em que há poros vazios, para onde a água e o solo possam mover-se.

Vaz (1989), utilizando um minitomógrafo, estudou a compactação de solos causada pela ação de máquinas agrícolas, detectando pequenas variações na densidade, mesmo em camadas da ordem de milímetros.

De acordo com Vaz et al. (1990), a compactação do solo é um processo causado pela ação de forças na superfície ou no interior deste. O resultado deste processo é a redução da porosidade, trazendo como conseqüência a dificuldade de penetração da solução do solo, resistência a penetração de raízes e problemas de manejo. O método gravimétrico fornece o valor da umidade na qual a compactação é máxima, mas não esclarece a

distribuição espacial da porosidade e como a água se difunde no seu interior após a aplicação da pressão.

Pedrotti et al., (1996) avaliando a densidade do solo por tomografia computadorizada em diferentes sistemas de preparo, observaram que os sistemas que envolveram maior mobilização do solo apresentaram os maiores valores de densidade do solo na camada 0-0,10 m. Segundo Pedrotti et al. (2003), a TC é uma técnica nova que não perturba a estrutura natural das amostras, apresentando sensibilidade e alta resolução espacial. Além do valor médio, no caso da densidade e umidade do solo, a TC indica a localização exata das possíveis heterogeneidades presentes internamente e valores extremos, pois desconsidera a isotropia espacial.

A TC também possibilita a avaliação de amostras *in situ*. Uma aplicação desta técnica é o uso do tomógrafo de campo desenvolvido por Naime (1994) para investigar solo, raízes e árvores. O autor concluiu ser possível a avaliação com o tomógrafo diretamente em campo obtendo dados precisos.

Naime (2000) ainda mensura a densidade do solo de áreas agrícolas identificando o selamento da superfície do solo, por exemplo, que é um fenômeno causado pelo impacto de gotas de chuva ou da irrigação no solo. Ao caírem, as gotas formam micro-crateras com algumas partículas finas e com poros entupidos, que acabam bloqueando a passagem de água e reduzindo a infiltração de água nas camadas mais profundas, podendo futuramente ocasionar a erosão.

A TC é uma técnica de grande importância na área de florestas também, uma vez que possibilita a determinação da densidade da madeira, com o objetivo de tentar diminuir o impacto ecológico gerado pela extração de espécies nativas das regiões em conservação como a amazônica, além da detecção de pragas localizadas no interior da madeira, detectando a praga e possibilitando apenas o corte das árvores com a praga, significando economia à empresa (NAIME, 2000).

Fante et al. (2002), comparando área sob vegetação nativa (caatinga) e área de soja e milho em cultivos alternados e irrigada por pivô central através de metodologias para determinação da densidade do solo, obtiveram que as principais diferenças foram pela TC em comparação ao método do torrão impermeabilizado, permitindo avaliação pontual da

amostra de solo e conseqüentemente, uma análise do comportamento da sua densidade em finas camadas (0,0025 m).

Com a mesma finalidade, no controle de pragas, Crestana et al. (1988), utilizaram a TC para o acompanhamento diário da evolução da broca no interior da cana-de-açúcar e concluíram ser viável e com esta técnica medir a quantidade de material destruído pela praga.

Com base nos dados fornecidos pela literatura, pode-se observar que os diferentes sistemas de cultivo do solo afetam diferentemente os parâmetros físicos do mesmo, mais especificamente a sua densidade e porosidade. Pedrotti et al. (1996) evidenciaram que a TC permite a determinação e localização exata de ocorrência de camadas compactadas em solos de várzea, onde os métodos tradicionais de caracterização física do solo não são os mais adequados.

Do ponto de vista metodológico, um aspecto importante a se considerar no trabalho com a tomografia é o da invariância de escala, uma vez que os solos são meios naturais complexos do ponto de vista da descrição física, com uma estrutura hierárquica composta de um conjunto contínuo de níveis organizacionais que vão da escala nanométrica (argilas e minerais associados) à macroescala (torrões e horizontes), apresentando-se como meios porosos multifásicos, contendo tanto líquidos quanto gases (MACEDO et al., 1996).

#### **4.3.2- Anel Volumétrico**

O método do anel volumétrico fundamenta-se no uso de um anel de aço com bordos cortantes e com capacidade interna conhecida, que é cravado no solo e removido com excesso de terra que posteriormente é retirado com o auxílio de uma faca em ambas as extremidades do anel. A amostra é colocada posteriormente em estufa, e a densidade do solo calculada pela relação:  $D_s = m_s/v$ ,  $D_s$  = densidade do solo;  $m_s$  = massa da amostra seca em estufa;  $v$  = volume do anel (Kiehl, 1979; EMBRAPA, 1997).

A densidade do solo pode ser alterada de acordo com o manejo adotado, de maneira geral em condições naturais, ou seja, sob vegetação de origem, a densidade do solo apresenta-se com valores distintos aos encontrados quando o solo é

submetido a qualquer tipo de manejo de solo. Costa et al.(2003), avaliando os efeitos a longo prazo dos sistemas de manejo (preparo convencional e plantio direto) nas propriedades físicas do solo, observaram que em relação ao solo sob mata, houve uma tendência de incremento na densidade do solo na camada de 0-0,20 m, em ambos os sistemas, demonstrando que o uso do solo para fins agrícolas, independentemente do sistema de manejo utilizado, promove alterações nas suas propriedades físicas.

Para Oliveira et al. (2003) as alterações estruturais de um Latossolo sob diferentes uso e manejo são independentemente da profundidade e da época das coletas das amostras, o solo sob Cerrado apresentou menor densidade ( $0,90 \text{ kg.dm}^{-3}$ ) e maior relação macroporos: microporos (1,08) comparado ao plantio direto ( $1,12 \text{ kg.dm}^{-3}$ ) e preparo com arado de discos ( $1,15 \text{ kg.dm}^{-3}$ ), resultado da interferência do homem por meio da ação de máquinas e equipamentos, nestes dois sistemas de plantio. Estes autores puderam verificar na profundidade de 0-5 cm, no plantio direto, após duas décadas de manejo contínuo, a relação macroporos: microporos (0,59) foi igual à do preparo com arado de discos (0,66), provavelmente, devido ao maior teor de matéria orgânica no sistema plantio direto, estatisticamente idêntico ao do solo sob Cerrado.

O aumento da densidade do solo na área cultivada pode ser explicado pela redução nos teores de matéria orgânica em comparação com o solo sob mata nativa (ARAUJO et al., 2004). Esses autores determinaram teores de matéria orgânica de  $18,4 \text{ g dm}^{-3}$ , no solo sob mata nativa, e de  $11,1 \text{ g dm}^{-3}$ , no solo cultivado, estatisticamente diferentes ao estudarem as propriedades físicas de um Latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa.

#### **4.4- Porosidade do Solo**

Os diferentes sistemas de manejo exercem seus efeitos na formação e estabilização dos agregados de forma diferenciada e que, dependendo do tipo de cultura e preparo do solo, os efeitos serão maiores ou menores em termos de desestruturação ou degradação.

A porosidade de um solo é a razão do volume total de poros para o volume total de solo, e é usualmente expressa em porcentagem.

Não se deve esquecer que o solo é o meio que faz a água, ar, nutrientes, luz e calor trabalharem juntos permitindo o crescimento das plantas. O solo constitui-se na principal fonte para a produção de alimentos e uma vez improdutivo as chances de recuperação são pequenas e difíceis.

Segundo Silva & Mielniczuk (1997), sob uso agrícola e utilização intensiva do solo com sistemas de cultivo inadequados há contribuição para a degradação das características químicas, físicas e biológicas do solo. Assim, as reduções da estabilidade em água e destruição dos agregados naturais e das unidades estruturais são ressaltadas, como consequência da redução do conteúdo de matéria orgânica e da compactação pelo tráfego de máquinas agrícolas.

De acordo com Denardin (1984) para as condições de solo, clima e espécies cultivadas anualmente sob motomecanização das regiões Sul, Centro-Sul e Centro-Oeste do Brasil, o manejo adequado do solo deve englobar um conjunto de práticas agrícolas que proporcionem as seguintes condições: retenha ao máximo a água das chuvas; incremente a velocidade de infiltração de água no solo; reduza a velocidade de escoamento superficial da água não infiltrada no solo; aumente a capacidade de armazenamento de água no solo e proporcione boas condições físico-químicas para o desenvolvimento das culturas.

A distribuição do diâmetro dos poros no solo tem um papel preponderante nesse contexto. Através de lâminas delgadas, Curmi et al. (1994), relataram que o espaço poroso é constituído por dois tipos de poros: um resultante do arranjo dos microagregados, formando o espaço poroso intra-agregados, contínuo, irregular e policôncavo e que ocupa um volume importante do solo (diâmetro  $< 0,0002$  mm), ao passo que o outro é formado por canais e cavidades com dimensões maiores (diâmetro  $> 0,0002$  mm), denominados poros interagregados (micro e macroporos).

Os manejos do solo afetam apenas os poros interagregados, enquanto os poros dentro dos agregados não sofrem quaisquer alterações em razão da sua grande estabilidade. Ao comparar diferentes métodos de manejo de solo, Wu et al. (1992) relatam que no sistema de plantio direto os poros conduzem água mais eficientemente do que no preparo convencional. Assim o solo apesar de menor porosidade total, apresenta condutividade hidráulica igual ou superior à do preparo convencional.

Klein & Libardi (2002), estudando um LATOSSOLO VERMELHO sob três manejos (sequeiro, irrigado, mata) observaram que o manejo do solo irrigado aumentou a densidade do solo até a profundidade de 0,4 m, diminuiu a porosidade total e alterou a distribuição do diâmetro dos poros, acarretando a conseqüente diminuição do volume de macroporos e aumentando de micro, além de densidades superiores a  $1,256 \text{ Mg.m}^{-3}$ , a porosidade de aeração passou a ser limitante.

O processo de compactação é influenciado pela textura do solo, pois esta modifica várias propriedades do solo como a relação do tamanho dos poros, retenção de água, densidade do solo e resistência crítica do solo a penetração. Isto pode ser observado por Albuquerque et al. (2001), que constataram que a estrutura do solo foi degradada no sistema convencional e no plantio direto, em comparação à da mata, quando observado macro, micro, porosidade total, densidade do solo, resistência à penetração e condutividade hidráulica saturada.

É necessário ressaltar que nem sempre diferenças significativas entre os manejos são encontradas, principalmente ao se comparar sistemas de manejo convencional e semeadura direta, pois em sistemas conservacionistas são necessários de três a quatro anos para se desenvolver porosidade mais favorável na camada de 0-0,15 m, comparado a solos arados e discado continuamente, de acordo com literaturas consultadas.

#### **4.4.1- Mesa de Tensão**

Para determinação da porosidade do solo, pela mesa de tensão, utilizam-se amostras volumétricas de solo saturadas, que são colocadas sobre a mesa de tensão. A altura da coluna de água, abaixo da mesa, deve ser ajustada para se obter a tensão desejada, que irá provocar a drenagem da água retida nos poros do solo, através da sucção provocada pelo vácuo formado na mesa de tensão. Ajustando-se a coluna para uma tensão de 0,006 MPa a água dos macroporos (poros com diâmetro maior ou igual 0,05 mm) será drenada. Após pesagem, antes e depois de se colocar as amostras na estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , obtém-se o volume total de poros, de macro e microporos (Kiehl, 1979; EMBRAPA, 1997).

Em termos de macroporosidade, Peña et al. (1996) verificaram que os tratamentos que receberam algum preparo mecanizado, antes da semeadura, obtiveram os

maiores valores de macroporosidade, e atribuíram ao revolvimento do solo, por ocasião do preparo. No entanto, aqueles solos que não receberam preparo mecanizado, apresentaram os menores valores de macroporos. Os autores constataram que solos não movimentados inicialmente são mais adensados que os trabalhados.

Quando o solo passa de uma condição natural (mata) para condição de cultivo, há mudanças nas características físicas, sendo estas mais afetadas quanto maior a intensidade de preparo do solo.

O uso da semeadura direta por vários anos, pode reduzir a densidade, devido ao acúmulo de resíduos culturais na superfície, que favorecem a reconstrução do solo (ROS et al., 1997). Voorhees & Lindstrom (1984) informam que são necessários três a quatro anos, sob condições de plantio direto, para desenvolver porosidade mais favorável na camada de 0-0,15 m, comparado a solos arados e discados continuamente.

Albuquerque et al. (1995), ao compararem plantio direto de sete anos com preparo convencional em Latossolo Vermelho-Escuro, não encontraram diferença significativa para densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, atribuindo a equalização das condições físicas ligadas às relações massa-volume do solo ao não controle de tráfego durante o experimento.

#### **4.4.2- Análise de Imagens de Blocos**

A estrutura do solo, embora não seja considerada um fator de crescimento para as plantas, exerce influência direta sobre movimentação de água, transferência de calor, aeração, densidade do solo e porosidade (LETEY, 1985).

A grande diversidade de áreas que são utilizadas para a exploração da agricultura brasileira, apresenta solos com comportamentos distintos, que devem ser levados em consideração durante o seu processo de manejo.

O oxigênio é fundamental para o desenvolvimento radicular das culturas e é comprovado experimentalmente que quando a porosidade de aeração é menor que 10% ocorrem prejuízos significativos no crescimento radicular.

Estudos quantitativos da estrutura do solo podem ser realizados por análise de imagem da estrutura, método proposto por micromorfologistas que desenvolveram

metodologias originais e um vocabulário abundante para a descrição da estrutura do solo (Kubiens, 1938; Stoops & Jongerius, 1975; Brewer, 1976; Bullock et al., 1985). O estudo da estrutura do solo pelos métodos micromorfológicos, originalmente qualitativos, passaram a uma dimensão quantitativa com o desenvolvimento de métodos de morfologia matemática (Serra, 1982; Horgan, 1998) e do desenvolvimento da informática.

A estrutura de um horizonte é a forma que suas partículas elementares (areia, silte, argila, matéria orgânica) se arranjam naturalmente formando ou não volumes elementares macroscópicos chamados agregados (ou “peds” ou “elementos estruturais” ou unidades estruturais”).

BREWER (1976), citado por Cooper (1999), propôs uma definição da estrutura do solo, que seria aplicável a qualquer nível de organização do solo considerado. Para este autor, a estrutura de um solo é a sua “constituição física expressa pelo tamanho, forma e arranjo das partículas sólidas e de vazios, incluindo as partículas primárias e as partículas secundárias”. Ele definiu também os conceitos de “soil fabric” que é o arranjo espacial dos elementos sólidos e de vazios associados.

Uma implicação prática, para a medida da estrutura do solo, ou seja, da distinção entre estrutura do espaço poral e estrutura dos sólidos do solo é que se pode quantificar a estrutura do solo por análise de imagens de blocos, técnica que consiste em coletar amostras indeformadas, e cujas imagens são posteriormente registradas e processadas em computador.

A quantificação em porcentagem fornece parâmetros do espaço poral úteis para fins puramente descritivos mas susceptíveis de serem ligados às características funcionais do solo (ZIDA, 1998) citado por Cooper (1999).

Olszewski et al. (2004) utilizaram a análise de imagens de agregados de um latossolo e encontraram diferenças entre os manejos de solo adotados.

Até meados da década de 1980, a micromorfologia de solos foi amplamente utilizada, quase que exclusivamente para estudos pedogenéticos, procurando elucidar problemas ligados aos processos de formação do solo. A partir de então, essa tendência tem mudado, passando a micromorfologia do solo e a análise de imagens de blocos a serem utilizadas em outras áreas da Ciência do Solo. A aplicação tem se destacado mais no âmbito das ciências agrárias, no estudo de estrutura e porosidade do solo, em problemas de manejo e conservação do solo e da água Cooper (1999).

Oliveira et al. (2003), estudando alterações estruturais em solos sob diferentes usos e manejos, revelam a dificuldade de diagnóstico de alterações na estrutura de um solo submetido a diferentes sistemas de uso ou manejo, quando normalmente se considera apenas o volume de poros maiores (macroporos) e menores (microporos) que 50 mm. Estes autores ainda verificaram que na profundidade de 0-5 cm, o plantio direto, em relação ao sistema de preparo com arado de discos, foi o que mais afetou o arranjo das classes de poros do solo, causando maior redução no volume de poros com diâmetros superiores a 145 mm, e o desenvolvimento de maior volume de poros entre 50 e 9,0 mm de diâmetro, sendo benéfico, pela maior retenção de água pelo solo, sem danos na sua porosidade.

Salienta-se que a maioria das plantas desenvolve satisfatoriamente seu sistema radicular quando a porcentagem de macroporos (poros maiores que 50 mm) está acima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Kiehl, 1979).

Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais interfere no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e na densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros efeitos (Silva et al., 1994).

Silva e Rosolem (2002) observaram que o cultivo anterior com aveia-preta, guandu e milho favorece o crescimento radicular da soja abaixo de camadas compactadas do solo. Rosolem et al. (1994) sugeriram que o menor desenvolvimento das raízes após atravessarem a camada compactada ocorre porque elas não conseguem se recuperar do estresse ao qual foram submetidas, e que esse esforço provoca maior gasto de fotoassimilados.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1- Localização e Descrição da Área Experimental**

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado (FCA/UNESP), na cidade de Botucatu, Estado de São Paulo, localizada à latitude de 22°51' S, longitude de 48°26' W e altitude média de 740 m. O solo um Latossolo Vermelho Escuro Distrófico (CARVALHO et al., 1983) atualmente LATOSSOLO VERMELHO Distrófico de acordo com os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

As avaliações procederam em áreas distintas, porém apresentando o mesmo tipo de solo, não sendo separadas em parcelas ou subparcelas de tamanho determinado, apenas as amostras foram coletadas aleatoriamente em área total (o que no experimento fora considerada parcela para melhor entendimento). As áreas avaliadas apresentavam-se em 3 sistemas: sistema de semeadura direta, sistema de preparo convencional e área com eucalipto (mata).

Do Quadro 1 constam a caracterização granulométrica do solo demonstrando a mesma classe textural, teores de argila dispersa em água, para as três áreas estudadas.

**Quadro 1.** Caracterização granulométrica e argila dispersa em água para os tratamentos e camadas estudados.

<b>Camada</b>	<b>Areia Grossa</b>	<b>Areia Fina</b>	<b>Areia Total</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila Dispersa</b>
<b>(m)</b>	<b>kg.dm<sup>-3</sup></b>					
<b>Semeadura Direta</b>						
<b>0-0,05</b>	386,00	358,50	744,00	200,75	55,25	151,00
<b>0,05-0,10</b>	308,50	427,50	736,00	212,75	51,25	166,25
<b>0,10-0,15</b>	308,25	420,25	728,50	219,75	51,75	161,75
<b>0,15-0,20</b>	308,50	413,25	721,00	225,75	53,25	176,00
<b>Preparo Convencional</b>						
<b>0-0,05</b>	353,50	423,75	777,25	174,25	48,50	128,25
<b>0,05-0,10</b>	321,50	447,25	768,75	179,75	51,50	140,50
<b>0,10-0,15</b>	325,25	433,00	758,25	189,00	52,75	147,50
<b>0,15-0,20</b>	311,25	438,75	750,00	199,25	50,75	159,25
<b>Mata</b>						
<b>0-0,05</b>	370,00	447,25	817,25	144,50	38,25	58,75
<b>0,05-0,10</b>	310,00	468,00	778,00	178,25	43,75	92,25
<b>0,10-0,15</b>	276,50	453,75	730,25	214,50	55,25	116,50
<b>0,15-0,20</b>	245,75	443,00	689,25	251,50	59,25	150,75

## 5.2- Delineamento Experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 3 repetições, constituindo-se os tratamentos por áreas/parcelas conduzidas em sistema de preparo convencional (SPC), parcela conduzida em sistema de semeadura direta (SSD), e parcela com eucalipto – mata (SM).

Na área em preparo convencional, desde 2001, foi cultivado milho (*Zea mays* L.) híbrido recomendado para a região, área que permaneceu alguns anos em pousio antes da instalação da cultura do milho. O manejo da cultura foi o recomendado, segundo a literatura, para suprir a demanda da cultura (RAIJ et al, 1997). A semeadura do milho deu-se no início da estação chuvosa (outubro 2002), tendo como espaçamento 0,90 m entre linhas, com 5,5 sementes viáveis por metro, para tal operação utilizou-se semeadora

tratorizada. O controle de plantas daninhas foi realizado com a aplicação de herbicida à base de atrazine e simazine em PRE (pré-emergência).

Na área em sistema de semeadura direta utilizou-se a cultura da soja, sendo conduzida nesse sistema desde 1999, além de apresentar sistema de rotação de culturas (aveia preta/triticale; milho e soja). Em maio de 2003 ocorreu a semeadura de triticale (*X Triticosecale* Wittmack). Em setembro foi semeado milho (*Pennisetum americanum* L.) para produção de palha e em novembro, após a dessecação do mesmo, semeou-se a soja (*Glycine max* L.), espaçada 0,45 m entre linhas. As culturas do triticale, de milho e da soja receberam os tratamentos culturais recomendados e a adubação foi realizada segundo RAIJ et al. (1997).

Além das áreas com milho, sob sistema convencional, e com soja, sob sistema de semeadura direta, utilizou-se uma área com eucalipto, a qual foi considerada como área de referência.

### **5.3- Avaliações**

As amostras de solo para as determinações foram coletadas nas entre linhas nas áreas de preparo convencional e sistema de semeadura direta. Na área com eucaliptos a coleta procedeu-se nos locais com menor influência de raízes, cumpinzeiros e formigueiros.

#### **5.3.1- Matéria Orgânica**

Para a determinação da matéria orgânica (RAIJ et al., 1987) o solo foi coletado nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, após a colheita do milho, nos tratamentos com preparo convencional, semeadura direta, e na área sob mata.

#### **5.3.2- Resistência do Solo à Penetração**

A resistência do solo à penetração, determinada com auxílio do penetrógrafo SC-60 (Soilcontrol) constituído de um dinamômetro, uma haste de 0,01 m de diâmetro e 0,60 m de comprimento e ponta com 0,012 m de diâmetro e 0,025 m de comprimento, possibilitou leituras de resistência ao ser introduzida no solo com força

constante, e concomitantemente o conjunto registrador fez as leituras dos valores de resistência.

Foram realizadas 4 repetições por parcela, nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, coletando-se, também, em cada parcela amostras para determinação do teor de água no solo, para as parcelas cultivadas com milho e soja.

### 5.3.3- Densidade do Solo

A densidade do solo foi determinada pelos métodos da tomografia computadorizada (T.C.) e do anel volumétrico nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m.

#### 5.3.3.1- Método da Tomografia Computadorizada

As amostras de solo foram coletadas verticalmente utilizando, como amostrador, cilindros volumétricos de cloreto polivinila (PVC-rígido) com dimensões de 0,25 m de comprimento e 0,05 m de diâmetro, aproximadamente (Figura 3).



**Figura 3.** Coleta com amostrador de PVC de 0-0,20 m no tratamento semeadura direta.

Em cada área de estudo (semeadura direta, preparo convencional e mata) coletaram-se 2 amostras de solo indeformadas. Os conjuntos cilindro + solo foram envolvidos em filme plástico e alumínio para conservação da umidade e manutenção da estrutura das amostras. As amostras foram encaminhadas ao laboratório de Física de Solos/Departamento de Recursos Naturais-FCA/UNESP, onde receberam parafina líquida (60 °C) nas extremidades para vedação, evitando assim que partes das amostras fossem perdidas em futuro manuseio (Figura 4).



**Figura 4.** Preparo da parafina (60<sup>0</sup>C) e amostras nos tubos de PVC com as extremidades parafinadas.

A densidade do solo foi então determinada com o auxílio de um tomógrafo computadorizado de primeira geração (NAIME, 1994), pertencente à EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, em São Carlos-SP.

O filme plástico, o alumínio bem como a parafina das extremidades das amostras foram retirados para a realização da varredura de cada amostra, restando apenas nos cilindros o solo coletado.

Para análise, as amostras de solo contidas nos tubos de PVC foram centralizadas no tomógrafo de maneira que o feixe colimado de radiação as percorresse totalmente, em diferentes ângulos, uma amostra por vez, como mostra a Figura 5. O tempo de varredura de cada amostra é determinado de acordo com o tamanho das amostras e precisão do tomógrafo, sendo assim o tempo de varredura foi de 23 horas e 30 minutos. O tomógrafo, utilizado tem como fonte de raios gama o elemento <sup>137</sup>Césio, cuja radiação é uma onda

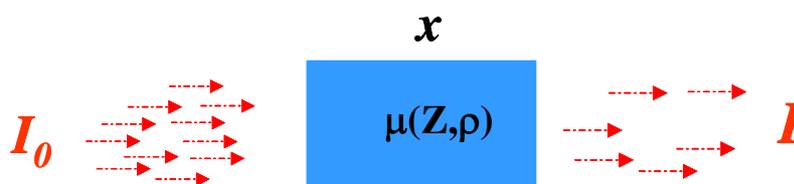
eletromagnética ionizante. Para maior segurança, a cápsula do  $^{137}\text{Cs}$  é blindada com camada 0,085 m de chumbo e o aparelho permanece em sala especial, onde as paredes são de concreto com 0,12 m de espessura.



**Figura 5.** Amostra sendo processada no tomógrafo de primeira geração.

A radiação incidente na amostra partiu da fonte ou colimador sendo captada pelo detector e em seguida armazenada e processada em microcomputador. Após a varredura das amostras com a unidade de campo, as mesmas foram secas em estufa a  $45^{\circ}\text{C}$  por 36 horas, pois os cilindros de PVC não suportariam temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  por 48 horas; em seguida as amostras retornaram ao tomógrafo e nova varredura foi realizada para determinação da umidade do solo.

Para determinar o coeficiente de atenuação de massa tomou-se uma amostra de solo seco em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas e peneirado em malha de 2 mm de cada tratamento (semeadura direta, preparo convencional e mata) que foi colocada em recipiente de volume conhecido e submetida à radiação (Figura 6; cálculos e equações de 2 a 4).



**Figura 6.** Representação da medida do coeficiente de atenuação em massa.

$$\text{Amostra homogênea: } \mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I}$$

a) Determinação do coeficiente de atenuação de massa para o solo em semeadura direta.

$$M_T = 148,64\text{g}$$

$$\text{Tomografia da cubeta vazia: } \mu = 0,102 \text{ cm}^{-1}$$

$$M_S = 102,89\text{g}$$

$$\text{Cubeta} = 45,75\text{g}$$

$$\rho = \frac{102,89\text{g}}{80 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 1,2861 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,102 \text{ cm}^{-1}}{1,2861 \text{ g.cm}^{-3}} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\mu_m = 0,07931 \text{ cm}^2.\text{g}$$

b) Determinação do coeficiente de atenuação de massa para o solo da mata.

$$M_T = 150,71\text{g}$$

$$\text{Tomografia da cubeta vazia: } \mu = 0,105 \text{ cm}^{-1}$$

$$M_S = 104,96\text{g}$$

$$\text{Cubeta} = 45,75\text{g}$$

$$\rho = \frac{104,96\text{g}}{80 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 1,312 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,105 \text{ cm}^{-1}}{1,312 \text{ g.cm}^{-3}} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\mu_m = 0,08003 \text{ cm}^2.\text{g}$$

c) Determinação do coeficiente de atenuação de massa para o solo em preparo convencional.

$$M_T = 140,33\text{g}$$

$$\text{Tomografia da cubeta vazia: } \mu = 0,101 \text{ cm}^{-1}$$

$$M_S = 94,58\text{g}$$

$$\text{Cubeta} = 45,75\text{g}$$

$$\rho = \frac{94,58\text{g}}{80 \text{ cm}^3} \quad \rho = 1,1823 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,101 \text{ cm}^{-1}}{1,1823 \text{ g.cm}^{-3}} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$\mu_m = 0,0854 \text{ cm}^2.\text{g}$$

onde:  $M_T$  = massa de solo total  
 $M_S$  = massa de solo seca

Como os coeficientes de atenuação dos solos foram próximos tomou-se um  $\mu$  médio para todos os tratamentos ( $\mu = 0,082 \text{ cm}^2.\text{g}$ )

Portanto, para calcular a densidade em cada ponto da área da seção transversal analisada, dividiu-se o coeficiente de atenuação linear (obtido na reconstrução da imagem) pelo coeficiente de atenuação de massa.

### 5.3.3 2- Método do Anel Volumétrico

As amostras de solo foram coletadas com anéis de aço de bordos cortantes e capacidade interna de  $50 \text{ cm}^3$ , que foram cravados no solo (Figura 7) removidos, retirando-se o excesso de terra com utensílio cortante, igualando ambas bordas do anel. Nas extremidades inferiores das amostras foi colocado tecido de algodão, preso aos anéis por fita elástica, com intuito de evitar perda da amostra de solo.



**Figura 7.** Visualização de uma trincheira para coleta de anéis de aço nas camadas estudadas.

As amostras com estrutura natural, indeformada, foram coletadas nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m com 4 repetições. Após a coleta as amostras foram secas em estufa (105°C por 24 horas), em seguida pesadas, calculando-se a densidade usando a fórmula  $D=M/V$ , (EMBRAPA, 1997).

### 5.3.4- Porosidade do Solo

#### 5.3.4.1- Método da Mesa de Tensão

As amostras volumétricas de solo (50 cm<sup>3</sup>), coletadas nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, com 4 repetições por tratamento, foram saturadas em água (Figura 8) durante 24 horas e, posteriormente, pesadas e submetidas a uma tensão de 6 kPa na mesa de tensão (Figura 9). Após o rompimento da coluna de água as amostras foram novamente pesadas e colocadas para secar a 105 °C por 24 horas. A partir dos dados de massa seca e úmida das amostras calculou-se a porosidade total (percentagem de saturação em volume) e a microporosidade ((a-b)/c), enquanto a macroporosidade foi obtida pela diferença entre porosidade total e microporosidade do solo (EMBRAPA, 1997).

Onde:

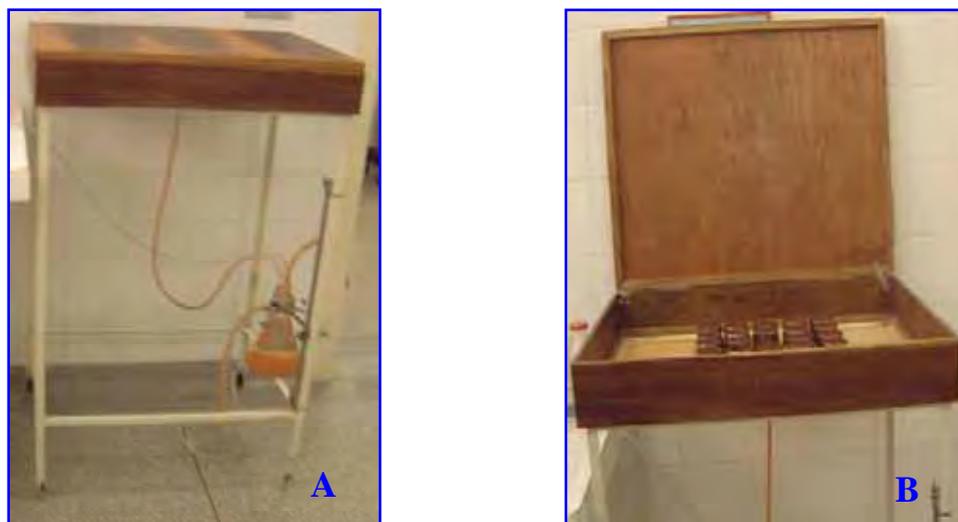
a = peso da amostra após ser submetida a uma tensão de 6 kPa;

b = peso da amostra seca a 105°C (g);

c = volume do cilindro



**Figura 8.** Amostras volumétricas sendo saturadas.



**Figura 9.** A) Mesa de tensão; B) Amostras volumétricas sendo processadas.

#### 5.3.4.2- Análise de Imagens de Blocos

Outra técnica que pode ser empregada para análise estrutural e quantificação da porosidade do solo é a análise de blocos (RINGROSE-VOASE, 1991). Esta técnica também possibilita a análise microscópica da estrutura do solo, porém neste trabalho foi considerada apenas a análise de blocos de solo.

As amostras indeformadas e orientadas foram coletadas, em maio de 2004, sendo 4 repetições. Para coleta utilizaram-se caixas confeccionadas em chapa metálica com 25 cm de comprimento por 10 cm de altura e 7 de largura. Procedeu-se ao entalhe do solo com uma faca, nas dimensões do molde (caixa), na parede previamente preparada de um pequeno perfil aberto nos tratamentos. Após coleta a amostra foi envolvida com filme plástico com intuito de proteger e manter a umidade do solo (Figura 10). Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de Física de Solos/Departamento de Recursos Naturais-FCA/UNESP para secagem ao ar por 120 dias.

As amostras foram então colocadas em caixas de papel cartão envolvidas em papel alumínio para receberem a resina impregnadora.

A resina foi preparada a partir da mistura de 500 mL de resina de poliéster, 250 mL de monômero de estireno, adicionada de 20 gotas de catalisador e 10 g de

pigmento sensível a luz ultravioleta “UVITEX”<sup>(R)</sup> (Ciba Specialty Chemicals). As amostras de solo foram colocadas em dessecador e a resina foi adicionada aos poucos para impregnação até dois centímetros acima da superfície da amostra (Figura 11). Depois de algumas horas, quando toda a amostra estava impregnada, aguardou-se o processo de cura por 48 horas, aproximadamente.



**Figura 10.** Detalhe da trincheira para coleta do bloco de solo em sistema de semeadura direta.



**Figura 11.** A) Impregnação da amostra com resina com auxílio de bomba a vácuo e dessecador. B) Detalhe do amostrador de aço usado em campo para a coleta e da amostra impregnada dentro da forma de alumínio.

Concluindo o processo de cura os blocos foram cortados com auxílio de uma serra elétrica e as imagens registradas com uma máquina fotográfica digital de resolução de 2 Mega Pixel e, posteriormente utilizando-se o programa Adobe Photoshop 7.0 as imagens foram analisadas e por contraste de cor a porcentagem de poros foi calculada (imagens binarizadas).

#### **5.4- Análise Estatística**

Com exceção das imagens de blocos os demais dados foram submetidos ao teste F para análise de variância e ao teste de Tukey para a comparação de médias a 5% de probabilidade.

## 6.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1- Matéria Orgânica x Sistemas de Manejo

Nos Quadros 2 e 3 encontram-se, respectivamente, os teores de matéria orgânica e os valores de F para os tratamentos e camadas estudados, onde se verifica significância a 1 % para tratamentos, camadas e interação entre tratamentos e camadas.

**Quadro 2.** Análise de variância para os teores de matéria orgânica.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Tratamentos (A)	2	895,2917	447,6458	51,32 **
Camadas (B)	3	486,1667	162,0556	18,58 **
Interação A x B	6	299,2083	49,8681	5,71 **
Resíduo	36	314,0000	8,7222	
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>1680,6667</b>	<b>152,7879</b>	

C.V. % = 14,89    D.M.S. = 2,5522

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

**Quadro 3.** Teores médios de matéria orgânica ( $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ) para os tratamentos estudados.

Tratamento	Camadas (m)				Média
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20	
<b>Semeadura Direta</b>	19,00 bA	15,50 bA	14,25 bA	13,50 aA	<b>15,56 c</b>
<b>Preparo Convencional</b>	18,50 bA	20,00 bA	19,50 aA	14,75 aA	<b>18,19 b</b>
<b>Mata</b>	35,75 aA	26,00 aB	22,75 aBC	18,50 aC	<b>25,75 a</b>

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os teores de matéria orgânica (Quadro 3) foram superiores no sistema mata (SM) demonstrando que os sistemas naturais possuem teores de matéria orgânica mais elevados do que as áreas submetidas ao preparo de solo. Observa-se neste mesmo tratamento a redução significativa da matéria orgânica com o aumento da profundidade, o que não ocorre no sistema de semeadura direta (SSD) e sistema de preparo convencional (SPC), tendo no SSD uma tendência de redução nos valores de matéria orgânica com o aumento da profundidade do solo, enquanto no SPC os teores de matéria orgânica são superiores nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e menores a 0-0,05 e 0,15-0,20 m, respectivamente. Este comportamento dos teores de matéria orgânica na área em SPC deve-se ao período em pousio da área durante alguns anos antes da instalação da cultura do milho (até 2001). Provavelmente ao preparar o solo para o cultivo boa parte da palhada foi incorporada, resultando em valores superiores de matéria orgânica na camada de 0,05-0,20 m, quando comparado ao SSD.

Os sistemas de manejo acarretam mudanças nos teores de matéria orgânica do solo. Os solos cultivados apresentam, normalmente, teores de matéria orgânica mais baixos que os solos sob vegetação nativa. As perdas de matéria orgânica nos solos cultivados, ocorrem pela oxidação dos compostos orgânicos e pelo arraste da camada superficial do solo pela erosão hídrica, conforme comenta DE MARIA (1999).

Os manejos de cultura que controlam as perdas de terra diminuem as perdas de matéria orgânica mas, nem sempre, são os que mantêm maior teor de carbono orgânico no solo. Nos tratamentos normalmente utilizados em cultivos extensivos, sempre há uma queda no teor de matéria orgânica em relação à situação inicial, qualquer que seja a prática utilizada. O preparo do solo, aumentando a aeração e alterando a quantidade de material vegetal que retorna ao solo é, provavelmente, o fator que mais influencia este

processo. Dessa forma, o aumento da matéria orgânica do solo só é possível com sistemas conservacionistas, especialmente o plantio direto.

O não revolvimento do solo e a adição dos resíduos das culturas na superfície do solo em semeadura direta desencadeia inúmeros processos físicos, químicos e biológicos, como os processos que levam ao aumento da estabilidade dos agregados e dos estoques de matéria orgânica no solo. Os maiores teores de carbono orgânico determinam maior estabilidade de agregados e maior proteção física da matéria orgânica. A quebra dos agregados do solo durante o preparo convencional expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico do solo (COSTA et al., 2004).

## 6.2- Resistência à Penetração do Solo x Sistemas de Manejo

A resistência à penetração para o SM foi superior e estatisticamente diferente dos demais tratamentos apresentando um valor médio de 1,34 MPa. Ao comparar o SM com o SPC este apresentou uma resistência menor (0,66 MPa) devido à presença de camada intensamente revolvida do solo, que oferece uma menor dificuldade de penetração nos primeiros centímetros do solo (Quadro 4 e 5).

No Quadro 4 tem-se os valores de F que foram significativos a 1 % para os tratamentos e camadas estudados.

**Quadro 4.** Análise de variância para os valores de resistência à penetração.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos (A)	2	3,6330	1,8165	25,92 **
Camadas (B)	3	10,4820	3,4940	49,86 **
Interação A x B	6	0,6181	0,1030	1,47 <sup>ns</sup>
Resíduo	36	2,5225	0,0701	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>14,7332</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

C.V.% = 26,84 D.M.S. = 0,23

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

Klein et al. (1998), trabalhando com resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teores de água, encontraram para plantio direto um aumento da densidade do solo em relação à mata até a camada de 0,4 m, com

conseqüente aumento da resistência do solo à penetração, o que não foi encontrado na presente pesquisa.

No Quadro 5 pode-se observar que o SM foi o tratamento que apresentou os maiores valores de resistência, demonstrando as características do solo estudado e confirmando que os sistemas influenciam na resistência à penetração do solo, podendo até reduzi-la.

**Quadro 5.** Valores médios de resistência à penetração (MPa) para os tratamentos e camadas estudados.

Tratamento	Camada (m)				Média
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20	
<b>Semeadura Direta</b>	0,32	0,97	1,24	1,32	<b>0,96 b</b>
<b>Preparo Convencional</b>	0,04	0,29	0,95	1,38	<b>0,66 c</b>
<b>Mata</b>	0,55	1,24	1,67	1,89	<b>1,34 a</b>

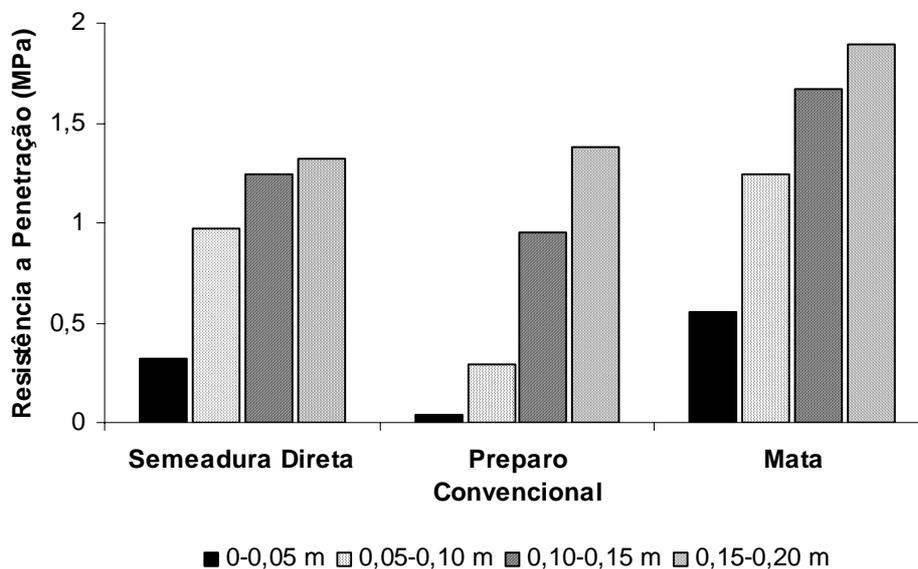
Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Estes resultados estão de acordo com Souza et al. (2001) que verificaram que a variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversas propriedades do solo, inclusive da resistência à penetração, é dependente de fatores de formação e do manejo do solo.

Na Figura 12 estão ilustrados os valores da resistência a penetração, que foram crescentes com a profundidade do solo. Tal comportamento está relacionado à redução dos teores de matéria orgânica em profundidade (Quadro 3) e ao aumento dos teores de argila (Quadro 1), uma vez que não houve diferenças significativas para os teores de água do solo entre os tratamentos e camadas estudados (Quadro 6).

**Quadro 6.** Valores médios de umidade do solo (%) para os tratamentos estudados.

Tratamento	Camada (m)			
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
<b>Semeadura Direta</b>	14,14	13,50	13,55	14,87
<b>Preparo Convencional</b>	13,13	15,15	15,67	14,11
<b>Mata</b>	13,54	11,91	12,19	14,28



**Figura 12.** Resistência do solo à penetração (MPa) para os tratamentos e camadas estudados.

### 6.3- Densidade do Solo

#### 6.3.1- Tomografia Computadorizada

No Quadro 7 estão apresentados os valores dos coeficientes de atenuação linear e densidade do solo para os tratamentos e camadas estudados. A densidade do solo foi determinada considerando o coeficiente de atenuação linear obtido para cada tratamento e em seguida determinou-se a densidade tomando o valor médio de  $\mu_{\text{média}} = 0,082 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$  para todos os tratamentos. É possível observar que os coeficientes de atenuação linear foram maiores na SSD, seguida do SPC e SM, comprovando que os diferentes tratamentos do solo afetam diretamente suas propriedades físicas. Pedrotti et al., (1996) avaliando a densidade do solo por tomografia computadorizada em diferentes sistemas de preparo, observaram que os sistemas que envolveram maior mobilização de solo apresentaram os maiores valores de densidade do solo na camada 0-0,10 m, concordando com os dados encontrados neste experimento, uma vez que SSD e SPC apresentam mobilização do solo.

**Quadro 7.** Coeficiente de atenuação linear  $-\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) e respectiva densidade do solo ( $\text{kg.dm}^{-3}$ ) para os tratamentos e camadas estudadas.

Camada (m)	Tratamento		
	Semeadura Direta	Preparo Convencional	Mata
<b>Coeficiente de atenuação linear (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>			
0-0,05	0,127	0,115	0,104
0,05-0,10	0,143	0,130	0,119
0,10-0,15	0,142	0,135	0,121
0,15-0,20	0,140	0,146	0,125
<b>Densidade para <math>\mu_{\text{média}} = 0,082 \text{ cm}^{-2}.\text{g}^{-1}</math></b>			
0-0,05	1,55	1,40	1,27
0,05-0,10	1,74	1,59	1,45
0,10-0,15	1,73	1,69	1,48
0,15-0,20	1,70	1,78	1,52
<b>Densidade (<math>\text{kg.dm}^{-3}</math>)</b>			
	$\mu = 0,08003 \text{ cm}^{-2}.\text{g}^{-1}$	$\mu = 0,0854 \text{ cm}^{-2}.\text{g}^{-1}$	$\mu = 0,07931 \text{ cm}^{-2}.\text{g}^{-1}$
0-0,05	1,58	1,35	1,31
0,05-0,10	1,78	1,52	1,50
0,10-0,15	1,78	1,58	1,53
0,15-0,20	1,75	1,71	1,57

A análise de variância mostra resultados significativos ao nível de 1 % de probabilidade para os tratamentos e camadas estudados (Quadro 8), mas a interação tratamentos e camadas não foi significativa.

**Quadro 8.** Análise de variância para os valores de densidade do solo obtidos por meio da tomografia computadorizada.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos (A)	2	0,2601	0,1301	25,42 **
Camadas (B)	3	0,2406	0,8020	15,67 **
Interação A x B	6	0,0295	0,0049	0,96 <sup>ns</sup>
Resíduo	12	0,0614	0,0051	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>23</b>	<b>0,5301</b>	-	-

C. V. % = 4,53

D.M.S. = 0,0953

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

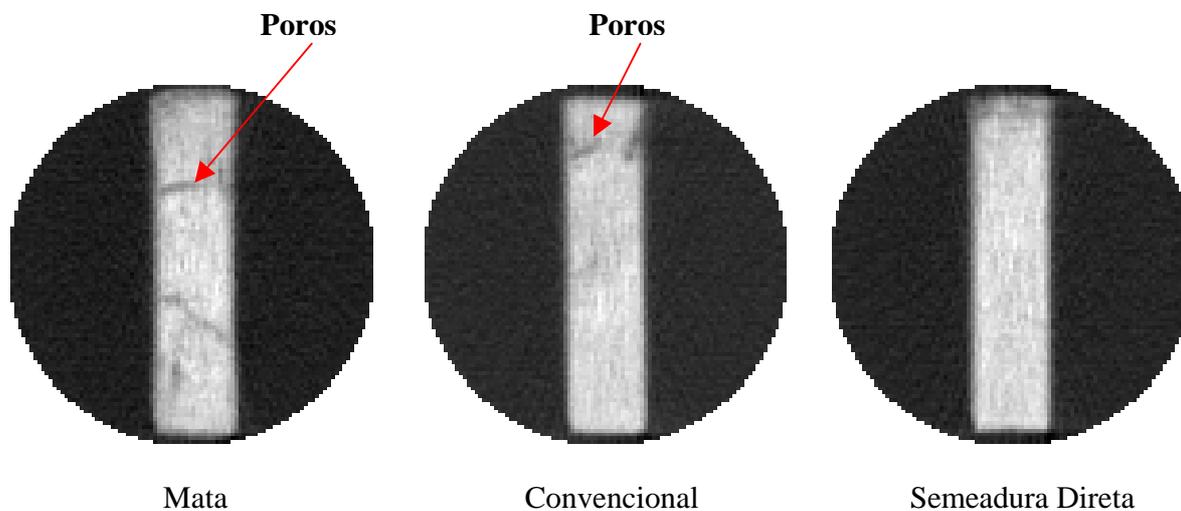
A densidade do solo apresentou-se maior para a SSD e não foi significativamente diferente entre SPC e SM (Quadro 9). Esse resultado está relacionado à mobilização do solo na camada de 0-0,20 m no SPC que, desestruturando o solo, proporciona valores de densidade abaixo dos encontrados na SSD e semelhantes aos da SM. Os valores encontrados para SSD podem ser atribuídos ao menor teor de matéria orgânica comparado aos demais tratamentos (Quadro 3), além de estar relacionado à acomodação natural das camadas e ao maior tráfego de máquinas.

**Quadro 9.** Densidade do solo obtida pela técnica da tomografia computadorizada para  $\mu$  (coeficiente de atenuação linear) de cada tratamento.

Tratamento	Camada (m)				Média
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20	
<b>Semeadura Direta</b>	1,58	1,78	1,78	1,75	<b>1,72 a</b>
<b>Preparo Convencional</b>	1,35	1,52	1,58	1,71	<b>1,54 b</b>
<b>Mata</b>	1,31	1,50	1,53	1,57	<b>1,48 b</b>

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Na Figura 13 constam as imagens dos tratamentos, obtidas pelo tomógrafo, sendo possível verificar maior homogeneidade das camadas em SSD em relação aos demais tratamentos, o que conferiu maior densidade a este sistema. Para SM e SPC pode-se verificar heterogeneidade superficiais no SPC e mais freqüentes no SM que correspondem à porosidade do solo, conforme Pedrotti et al. (2003) a TC é uma técnica nova que não perturba a estrutura natural das amostras, podendo indicar a localização exata das possíveis heterogeneidades presentes internamente e valores extremos, pois desconsidera a isotropia espacial.



**Figura 13.** Imagens dos tratamentos através do tomógrafo.

### 6.3.2- Anel Volumétrico

Para densidade do solo na camada de 0-0,05 m o SPC não diferiu do SSD. Quando se compara o SSD com o SM não houve diferença significativa. Nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m o SSD e o SPC diferiram do SM uma vez que resultaram em valores maiores do que esta, mas não diferiram entre si. Comparando os tratamentos na camada de 0,15-0,20 m pode-se verificar que não houve diferença significativa entre eles (Quadros 10 e 11).

Klein & Boller (1995) avaliando diferentes sistemas de manejo de solos e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto em relação à densidade do solo, também encontraram no sistema plantio direto a maior densidade na camada superficial do solo (0-0,05 m).

**Quadro 10.** Análise de variância para os valores de densidade do solo obtidos pela técnica do anel volumétrico.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Tratamentos (A)	2	0,6056	0,3028	20,26 **
Camadas (B)	3	0,0423	0,0141	0,94 <sup>ns</sup>
Interação A x B	6	0,0605	0,0100	0,67 <sup>ns</sup>
Resíduo	36	0,5379	0,0149	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>1,2464</b>	-	-

Densidade: C.V.% = 7,27  
D.M.S. = 0,1056

\*\* significativo a 1% de probabilidade  
<sup>ns</sup> valores não significativos

**Quadro 11.** Densidade do solo ( $\text{kg.dm}^{-3}$ ) pelo anel volumétrico para os tratamentos e camadas estudados.

<b>Tratamento</b>	<b>Camada (m)</b>			
	<b>0-0,05</b>	<b>0,05-0,10</b>	<b>0,10-0,15</b>	<b>0,15-0,20</b>
<b>Semeadura Direta</b>	1,76 ab	1,81 a	1,72 a	1,78 a
<b>Preparo Convencional</b>	1,80 a	1,71 a	1,75 a	1,76 a
<b>Mata</b>	1,58 b	1,42 b	1,50 b	1,59 a

Letras distintas e minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

### 6.3.3- Tomografia Computadorizada x Anel Volumétrico

Comparando-se os sistemas de manejo do solo, quanto à densidade do solo, verifica-se que os valores obtidos pelo método do anel volumétrico (Quadro 11) permitiram diferenciar o SM dos demais tratamentos nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m. O método da tomografia computadorizada (Quadro 9) permitiu diferenciar o SSD do SPC e SM apenas quando se considerou os valores médios encontrados para as quatro camadas estudadas.

Com relação aos coeficientes de variação pode-se verificar que o método do anel volumétrico resultou em valores mais elevados do que o método da tomografia computadorizada, ou seja, 7,27 % (Quadro 10) e 4,53 % (Quadro 8), respectivamente.

Os valores de densidade do solo obtidos pelos métodos do anel volumétrico e da tomografia computadorizada (Quadro 12) resultaram em diferenças

significativas para as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10m, com valores menores para o método da tomografia computadorizada.

Comparando-se os resultados de densidade do solo com os de resistência do solo à penetração, verifica-se que os valores encontrados para o método da tomografia computadorizada concordam com os de resistência, podendo-se, portanto, inferir que o método do anel volumétrico superestimou os valores de densidade do solo para o sistema de preparo convencional do solo.

**Quadro 12.** Valores da densidade ( $\text{kg.dm}^{-3}$ ) do solo obtidos pelos métodos da tomografia computadorizada (TC) e do anel volumétrico (AV) para as camadas de solo estudadas e coeficiente de variação (CV).

Método	Camada (m)			
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
<b>Semeadura Direta</b>				
TC	1,54 a	1,74 a	1,73 a	1,70 a
AV	1,78 a	1,80 a	1,71 a	1,78 a
C.V. (%)	5,05	3,46	3,63	2,26
<b>Preparo Convencional</b>				
TC	1,40 b	1,59 b	1,69 a	1,78 a
AV	1,79 a	1,70 a	1,75 a	1,76 a
C.V. (%)	4,14	0,88	12,08	3,86
<b>Mata</b>				
TC	1,27 a	1,45 a	1,47 a	1,51 a
AV	1,57 a	1,42 a	1,50 a	1,58 a
C.V. (%)	9,10	11,61	7,70	9,72

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## 6.4- Porosidade do solo

### 6.4.1- Mesa de Tensão

No Quadro 13 são apresentados os resultados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total para os tratamentos e camadas estudados.

A avaliação dessas variáveis foi significativa entre tratamentos para o teste F, sendo apenas a microporosidade significativa para camadas (Quadro 14).

**Quadro 13.** Macroporosidade, microporosidade e porosidade total para os tratamentos e camadas estudados.

<b>Tratamento</b>	<b>Macro</b>	<b>Micro</b>	<b>Porosidade Total</b>
-----%-----			
<b>Camada 0-0,05 m</b>			
<b>Semeadura Direta</b>	8,50 a	29,84 a	38,34 a
<b>Preparo Convencional</b>	10,72 a	22,82 b	33,54 b
<b>Mata</b>	9,78 a	32,78 a	42,56 a
<b>Camada 0,05-0,10 m</b>			
<b>Semeadura Direta</b>	8,65 a	27,28 a	35,93 b
<b>Preparo Convencional</b>	14,80 a	21,39 b	35,81 b
<b>Mata</b>	16,17 a	29,06 a	44,37 a
<b>Camada 0,10-0,15 m</b>			
<b>Semeadura Direta</b>	12,36 a	20,87 b	33,22 b
<b>Preparo Convencional</b>	14,80 a	19,96 b	34,76 b
<b>Mata</b>	16,17 a	29,28 a	45,45 a
<b>Camada 0,15-0,20 m</b>			
<b>Semeadura Direta</b>	10,71 a	21,26 b	31,97 b
<b>Preparo Convencional</b>	13,80 a	19,99 b	33,79 b
<b>Mata</b>	15,44 a	28,61 a	44,05 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**Quadro 14.** Análise de variância para os valores de macroporosidade, microporosidade e porosidade total.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
<b>Macroporosidade</b>				
Tratamentos (A)	2	154,1984	77,0992	4,00 *
Camadas (B)	3	150,2782	50,0927	2,60 <sup>ns</sup>
Interação A x B	6	35,8536	5,9756	0,31 <sup>ns</sup>
Resíduo	36	693,3164	19,2587	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>1033,6467</b>	-	-
<b>Microporosidade</b>				
Tratamentos (A)	2	637,5748	318,7874	43,36 **
Camadas (B)	3	219,0725	73,0241	9,93 **
Interação A x B	6	85,4119	14,2353	1,93 <sup>ns</sup>
Resíduo	36	264,6605	7,3516	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>1206,7198</b>	-	-
<b>Porosidade Total</b>				
Tratamentos (A)	2	950,8966	475,4483	56,19 **
Camadas (B)	3	28,3834	9,4611	1,11 <sup>ns</sup>
Interação A x B	6	98,5081	16,4180	1,94 <sup>ns</sup>
Resíduo	36	304,5734	8,4603	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>1382,3616</b>	-	-
Macro: C.V.% = 34,96	D.M.S. = 3,7938	** significativo a 1% de probabilidade		
Micro: C.V.% = 10,73	D.M.S. = 2,3440	* significativo a 5 % de probabilidade		
P- total: C.V.% = 7,69	D.M.S. = 2,5145	<sup>ns</sup> valores não significativos		

A macroporosidade não apresentou diferenças estatisticamente significativas para os tratamentos e camadas estudados. No entanto, observa-se que no SM há uma tendência de maior macroporosidade que nos demais tratamentos, exceto na camada de 0-0,05 m, o que pode estar relacionado com os maiores valores de areia total encontrados para esse tratamento (Quadro 1), matéria orgânica (Quadro 3) e possivelmente a maior atividade de organismos e raízes que contribuem para abertura de canais e galerias no solo.

Para a microporosidade nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m não houve diferença entre SSD e SM. Os valores de microporosidade obtidos para o SSD e SM foram superiores ao SPC. No entanto, nas camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m não houve diferença significativa entre SSD e SPC, sendo os valores de microporosidade menores quando comparados ao SM.

Como a microporosidade foi significativa entre as camadas (Quadro 14) houve desdobramento da análise para essa variável (Quadro 15). Para SSD as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m foram significativamente superiores as demais, não diferindo entre si. No SM e no SPC não foram encontradas diferenças significativas entre as camadas. Este aumento de microporosidade provavelmente está relacionado à redução dos macroporos devido ao tráfego de máquinas agrícolas na área sem que ocorra revolvimento do solo comparado ao SPC.

Na camada de 0-0,05 m a porosidade total foi significativamente superior no SM e SSD em relação ao SPC. Para as demais camadas o SM apresentou os maiores valores de porosidade total em relação aos demais tratamentos (Quadro 13). De acordo com os dados encontrados, ocorreu uma tendência de redução da porosidade total nas camadas estudadas para os tratamentos SSD e SPC o que está de acordo com Canalli & Roloff (1997) que dizem que a compactação do solo provoca um aumento na densidade do solo e uma redução na porosidade total, com aumento na proporção de poros menores em detrimento dos maiores.

**Quadro 15.** Desdobramento para a variável microporosidade (%).

Tratamento	Camada (m)				Média
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20	
<b>Semeadura Direta</b>	29,84 aA	27,28 aA	20,87 bB	21,26 bB	<b>24,81 b</b>
<b>Preparo Convencional</b>	22,82 bA	21,39 bA	19,96 bA	19,99 bA	<b>21,04 c</b>
<b>Mata</b>	32,78 aA	29,06 aA	29,28 aA	28,61 aA	<b>29,93 a</b>

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

#### 6.4.2- Análise de Imagens de Blocos

O uso do método de análise de imagens de blocos, possibilitou a visualização da porosidade e a quantificação da macroporosidade para os diferentes sistemas de manejo do solo. No Quadro 16 pode-se observar as porcentagens de macroporos e no Quadro 17 a análise de variância para os tratamentos estudados.

**Quadro 16.** Porcentagem de macroporos para os tratamentos e camadas estudados.

Tratamentos	Camada (m)				Média
	0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20	
SM	44,20 aA	19,91 aB	4,61 aC	2,23 bC	<b>17,74 a</b>
SPC	10,41 bB	2,15 bC	8,12 aBC	19,71 aA	<b>10,10 b</b>
SSD	10,07 bA	4,26 bA	7,10 aA	7,13 bA	<b>7,14 c</b>

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Os resultados obtidos mostram que a área com eucaliptos (SM) apresentou a maior porcentagem de macroporos com diferença estatística em relação aos demais sistemas de manejo, com 17,74 %, enquanto para sistema de preparo convencional e sistema de semeadura direta os valores percentuais foram inferiores, ou seja, 10,10% e 7,14%, respectivamente, demonstrando que o solo sofre alteração em sua porosidade, independentemente do manejo adotado. Dos componentes do manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais interfere no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e na densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros efeitos (Silva et al., 1994).

Para o SM as camadas estudadas apresentaram diminuição da porosidade com o aumento da profundidade do solo, comportamento que pode ser atribuído à maior atividade de organismos e raízes em superfície. Este comportamento da porosidade não foi encontrado para o SPC. Os valores de macroporos foram maiores nas camadas de 0-0,05m e 0,15 a 0,20 m, respectivamente, 10,41 e 19,71%, enquanto os menores valores ocorreram nas camadas de 0,05-0,10 (2,15%) e 0,10-0,15 m (8,12%), demonstrando que o solo ao ser

trabalhado até 0,20 m, tem sua porosidade afetada pelo manejo de maneira desuniforme, ou seja, pode ocorrer na superfície aumento da porosidade em razão da gradagem feita na área, porém nas camadas inferiores a porosidade se distribui de maneira desuniforme. Para o SSD obteve-se uma maior uniformidade da macroporosidade até a profundidade de 0-0,20 m.

Kiehl (1979) salienta que a maioria das plantas desenvolve satisfatoriamente seu sistema radicular quando a porcentagem de macroporos (poros maiores que 50 mm) está acima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

**Quadro 17:** Análise de variância para macroporos obtidos pelo método análise de imagens de blocos.

<b>Causas de variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
<b>Sistemas (A)</b>	2	956,6572	478,3286	48,47 **
<b>Profundidade (B)</b>	3	1629,0532	543,0177	55,02 **
<b>Interação A x B</b>	6	3548,4323	591,4054	59,93 **
<b>Resíduo</b>	36	355,2773	9,8688	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>47</b>	<b>6134,1427</b>	-	-

Densidade: C.V.% = 26,95

D.M.S. = 2,71

\*\* significativo a 1% de probabilidade

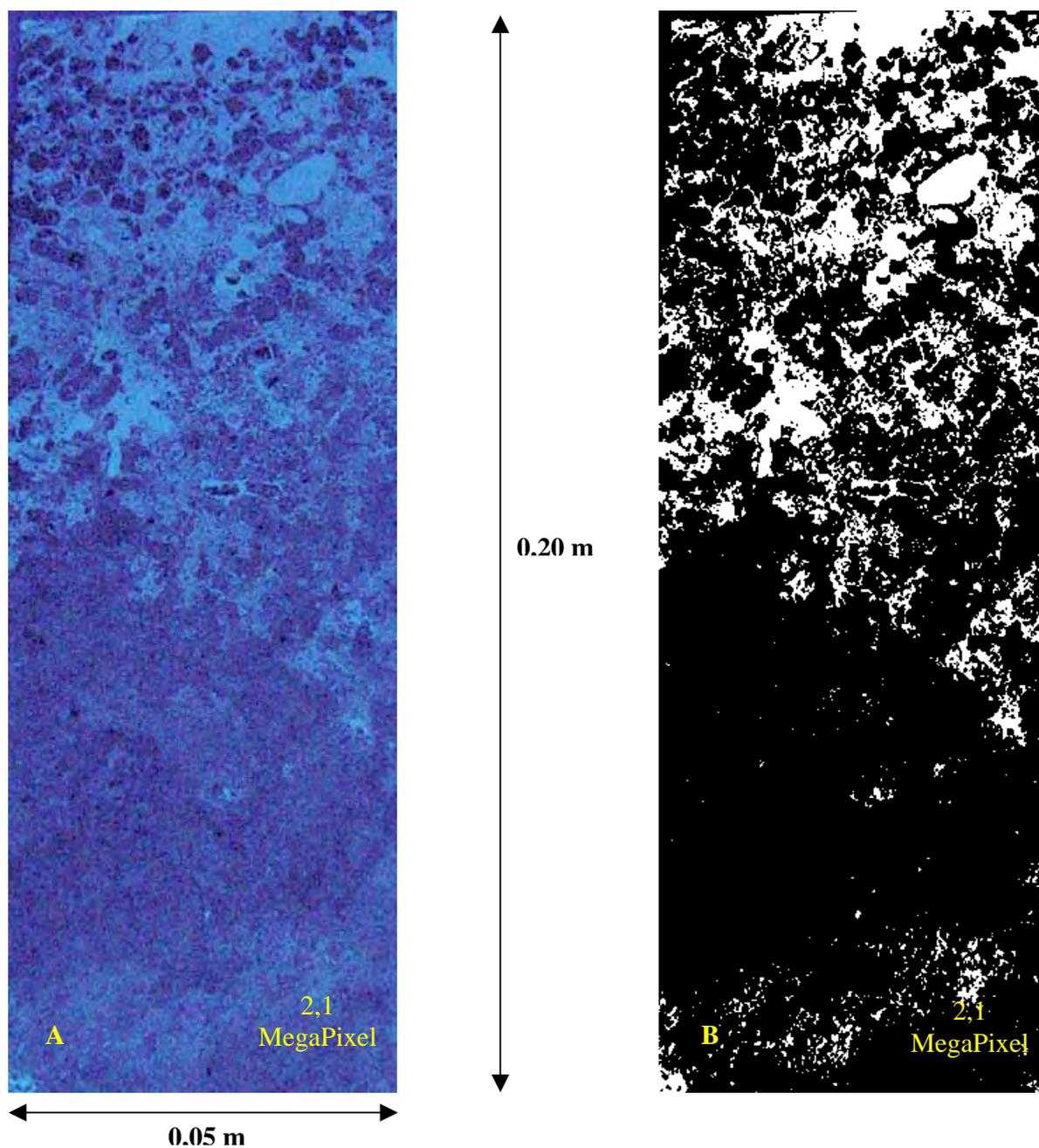
Nas Figuras 14, 16 e 18 são ilustradas as imagens dos blocos do SM, SPC e SSD na camada de 0-0,20 m, respectivamente, e nas Figuras 15, 17 e 19, as imagens de cada camada dos tratamentos (SM, SPC e SSD) estudados. O SM resultou em maior quantidade de macroporos ao longo do bloco quando comparado aos sistemas SSD e SPC, como resultado de maiores teores de matéria orgânica, areia total e da atividade de organismos e raízes.

Para o SPC pode-se observar na camada superior a imagem da camada arável (Figura 16), representada por rupturas no solo e, abaixo dessa camada, uma redução da macroporosidade, nitidamente observada entre 0,10-0,15 m (Figura 17 D3).

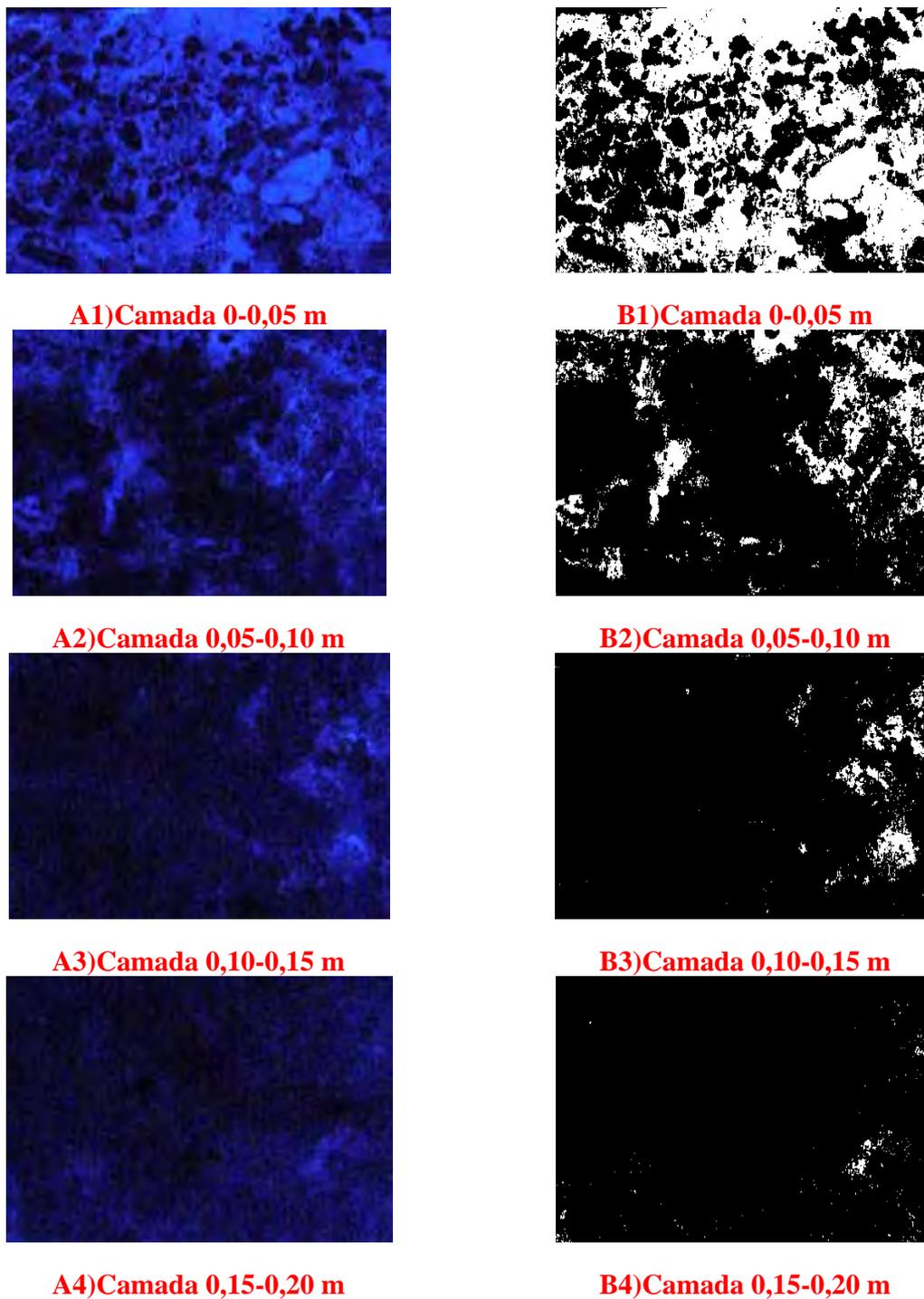
Para SSD observa-se uma maior macroporosidade na camada 0-0,05 m e uma melhor continuidade dos poros quando comparado ao SPC (Figura 18 e 19).

Esse resultado encontrado para SSD indica que este é um sistema de manejo que no decorrer dos anos contribui para melhoria da estrutura do solo.

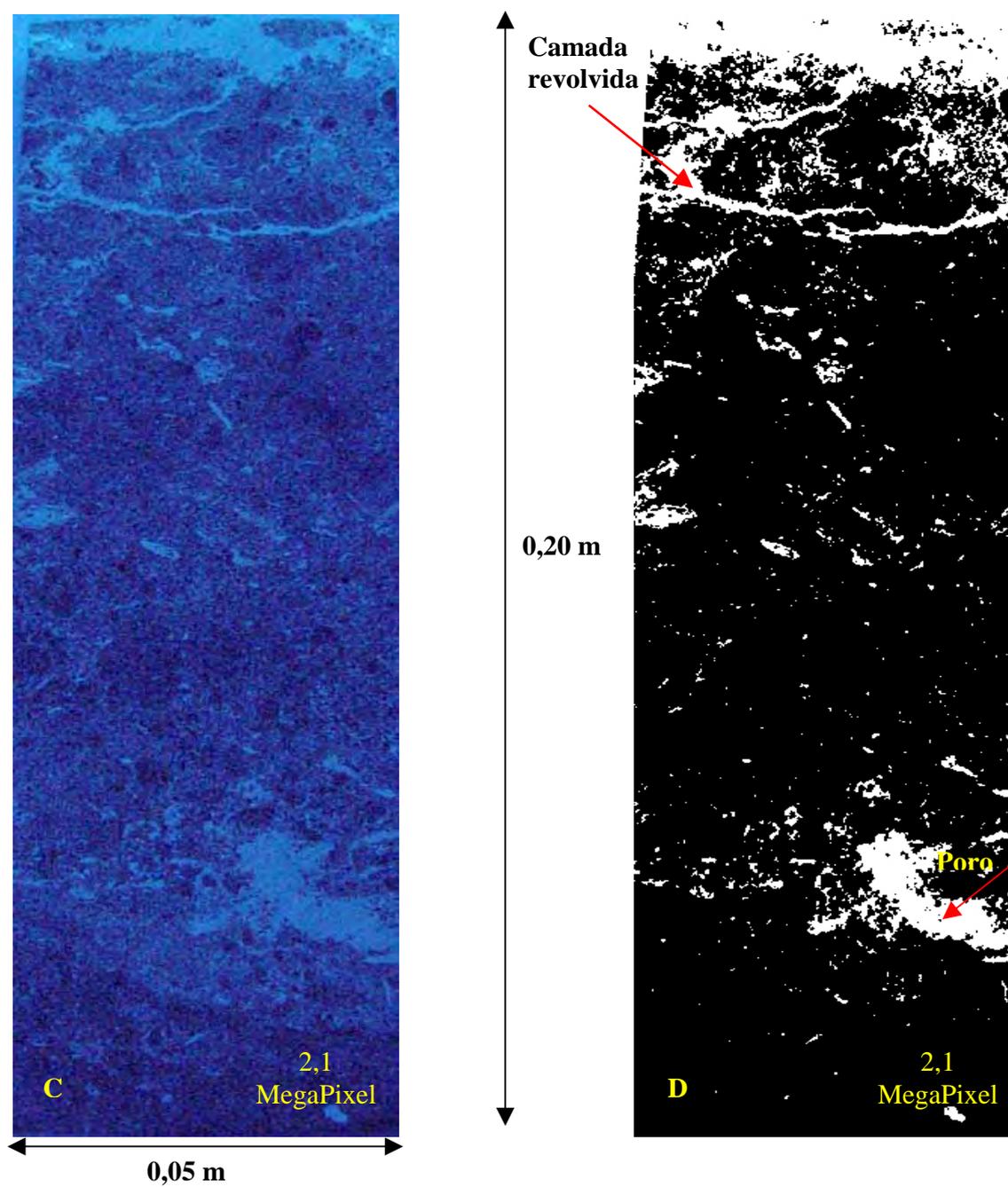
Schaefer et al. (2001), estudando a macroporosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas de preparo de solo, também observaram que a SSD proporcionou melhor conexão entre os macroporos que os tratamentos em que houve uso de grade pesada.



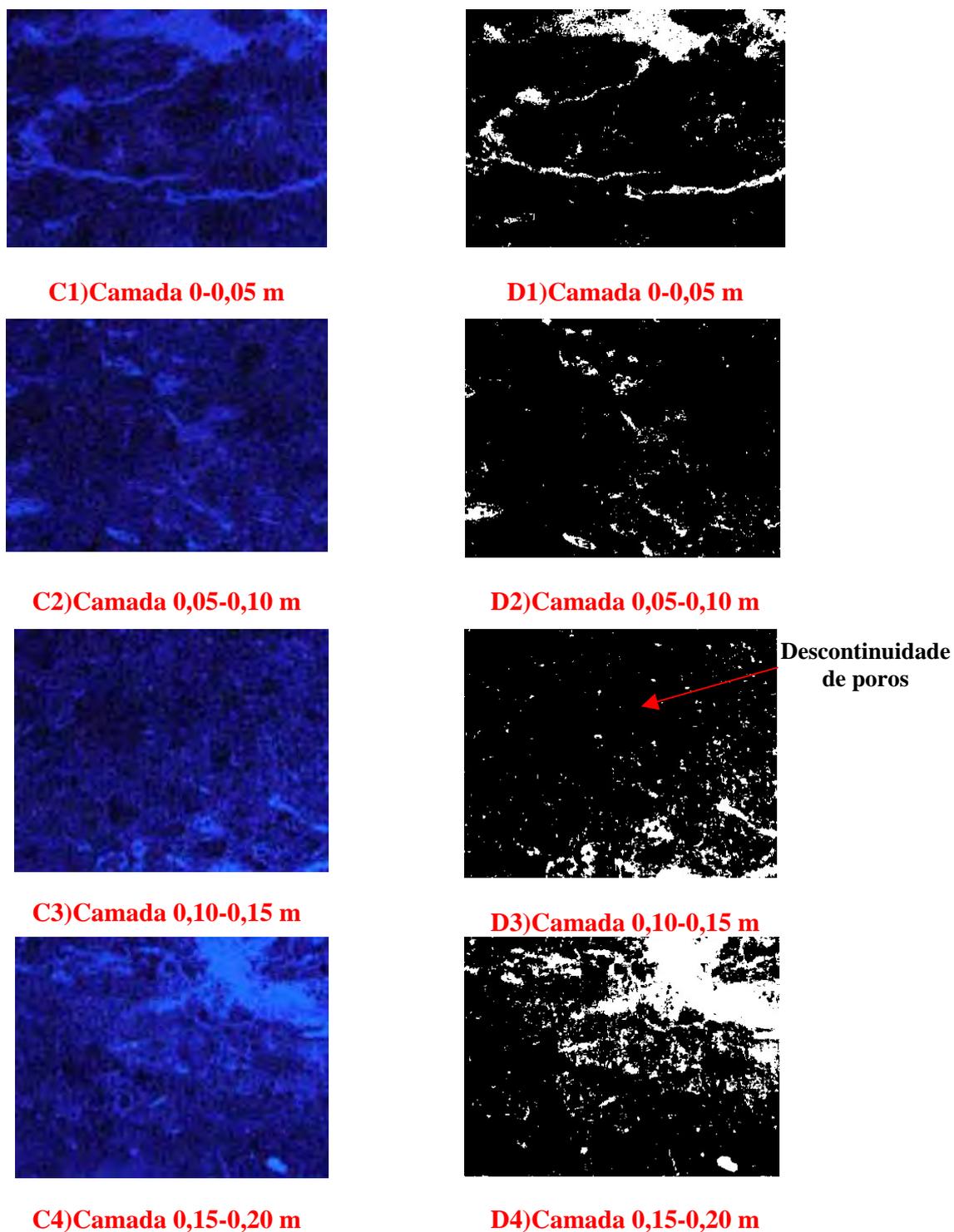
**Figura 14.** Distribuição poral do tratamento Mata para a camada 0-0,20 m; **A)** Imagem obtida com luz ultravioleta. **B)** Imagem binarizada onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.



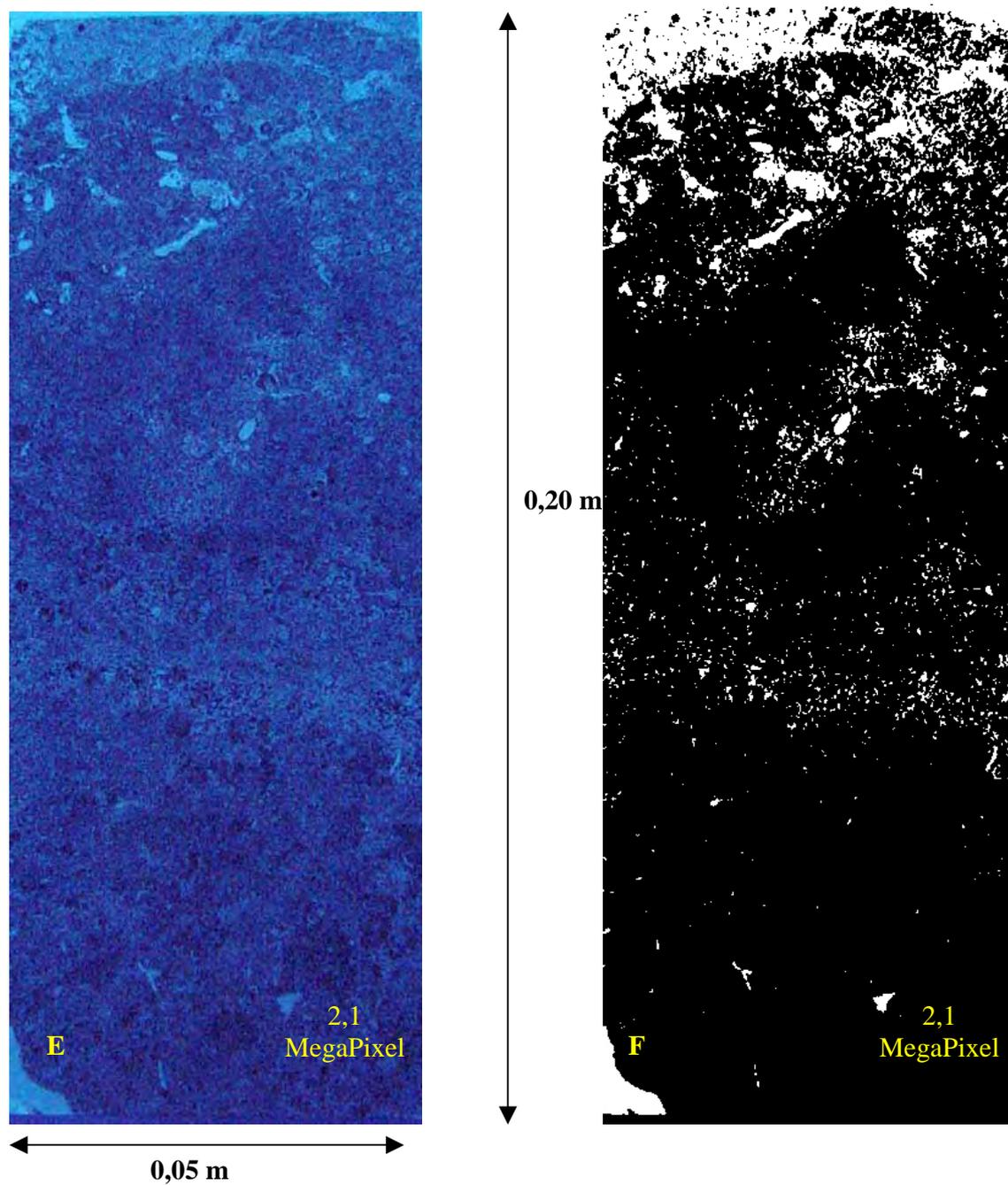
**Figura 15.** Detalhe das amostras do tratamento Mata em cada camada estudada. **A1, A2,A3 e A4** – imagens obtidas com luz ultravioleta; **B1, B2, B3 e B4** – imagens binarizadas onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.



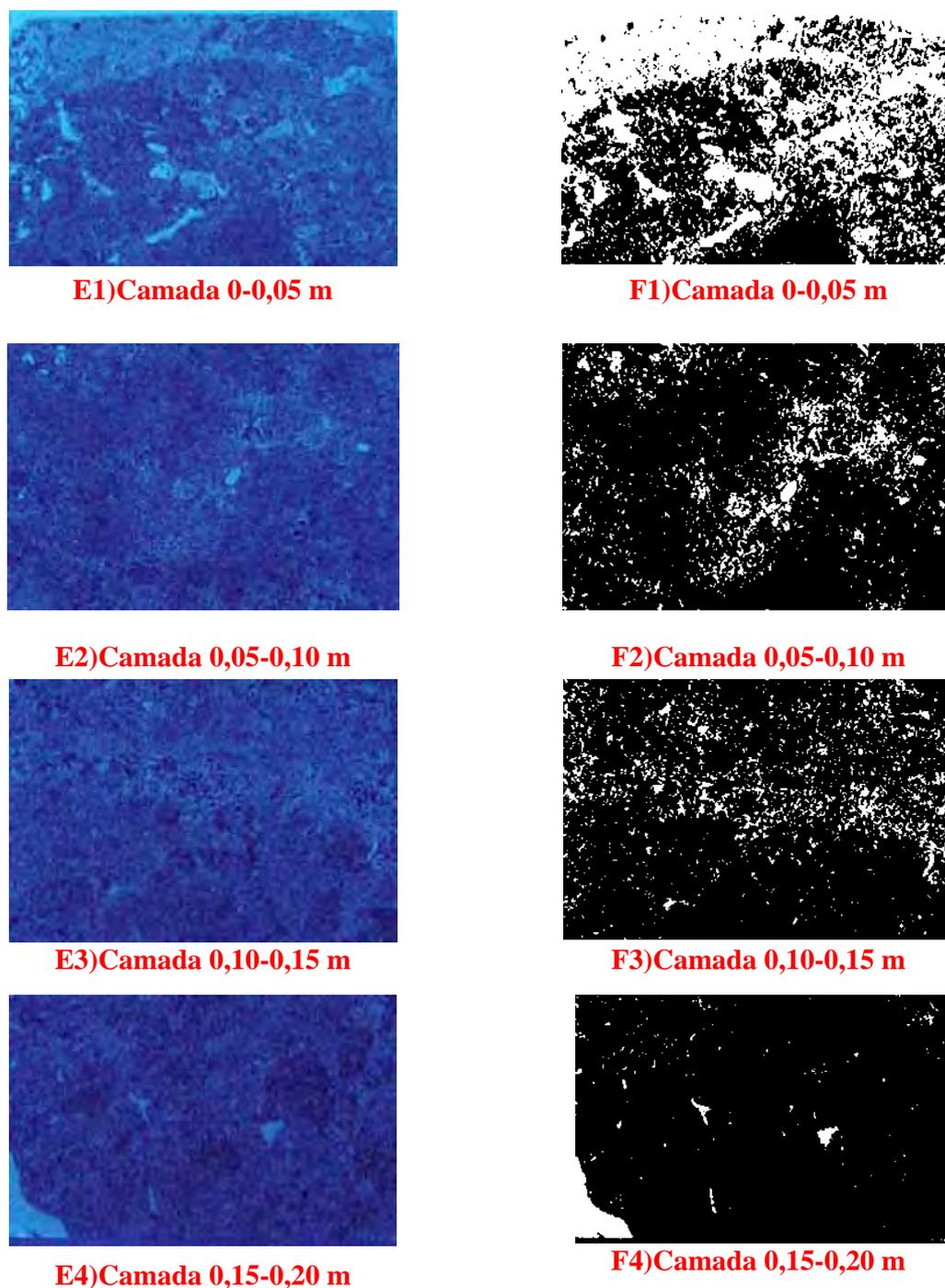
**Figura 16.** Distribuição poral do tratamento Preparo Convencional para a camada de 0-0,20 m; **C)** Imagem obtida com luz ultravioleta. **D)** Imagem binarizada onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.



**Figura 17.** Detalhe das amostras do tratamento Preparo Convencional em cada camada estudada. **C1, C2, C3 e C4** – imagens obtidas com luz ultravioleta; **D1, D2, D3 e D4** – imagens binarizadas onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.



**Figura 18.** Distribuição poral do tratamento Semeadura Direta para a camada de 0-0,20 m; **E)** Imagem obtida com luz ultravioleta. **F)** Imagem binarizada onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.



**Figura 19** Detalhe das amostras do tratamento Semeadura Direta em cada camada estudada. **E1, E2, E3 e E4** – imagens obtidas com luz ultravioleta; **F1, F2, F3 e F4** – imagens binarizadas onde os sólidos aparecem em preto e os poros em branco.

### 6.4.3- Mesa de Tensão x Análise de Imagens de Blocos

Comparando-se os sistemas de manejo do solo, quanto a macroporosidade verifica-se que os valores obtidos pela análise de variância foram significativamente diferentes, exceto para os métodos estudados, conforme consta do Quadro 18.

**Quadro 18.** Análise de variância para macroporosidade obtida pelo método da mesa de tensão e análise de imagens de blocos.

<b>Causas de Variação</b>	<b>G.L.</b>	<b>S.Q.</b>	<b>Q.M.</b>	<b>F</b>
Sistemas (A)	2	871,4340	435,7170	29,92 **
Métodos (B)	1	19,2515	19,2515	1,32 ns
Profundidade (C)	3	406,3154	135,4385	9,30 **
Interação A x B	2	239,4217	119,7108	8,22 **
Interação A x C	6	1603,6857	267,2810	18,35 **
Interação B x C	3	1373,0160	457,6720	31,43 **
Interação A x B x C	6	1980,6002	330,1000	22,67 **
Resíduo	72	1048,5937	14,5638	-
<b>Total (Tratamentos)</b>	<b>95</b>	<b>6493,7245</b>	-	-

Densidade: C.V.% =31,53

D.M.S. = 2,2847

\*\* significativo a 1% de probabilidade

<sup>ns</sup> valores não significativos

Os métodos da mesa de tensão e análise de imagens não resultaram em diferenças significativas quanto a macroporosidade (Quadro 19). No SM o método de análise de blocos apresentou uma média de 17,74 %, sendo estatisticamente superior a macroporosidade determinada pelo método da mesa de tensão (14,18 %), o que pode estar relacionado ao elevado número de raízes no SM. A presença de raízes e matéria orgânica contribuiu para uma diminuição do volume de solo quando determinado pelo anel volumétrico, tal diminuição foi observada no momento em as amostras foram submetidas à saturação e posteriormente a mesa de tensão.

No entanto, para os SPC e SSD os valores de macroporosidade foram superiores quando determinados pelo método da mesa de tensão, diferindo-se do método de análise de blocos. Em ambos tratamentos os valores de macroporosidade observados nas camadas estudadas tiveram menor variação de uma camada para outra quando determinados

pela mesa de tensão e conseqüentemente maior variação para a análise de imagens de blocos. Demonstrando que para sistemas com elevada presença de raízes, como as matas, a amostragens com blocos sofre menor variação na determinação da macroporosidade.

**Quadro 19.** Valores da macroporosidade do solo (%) obtidos pelos métodos da análise de imagens e da mesa de tensão para as camadas de solo estudadas.

Método	Camada (m)				
	0 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,15	0,15 – 0,20	0-0,20
<b>Sistema Mata</b>					
<b>Análise blocos</b>	44,20	19,91	4,61	2,23	<b>17,74 a</b>
<b>Mesa de tensão</b>	9,80	15,30	16,16	15,44	<b>14,18 b</b>
<b>Sistema de Preparo Convencional</b>					
<b>Análise blocos</b>	10,41	2,15	8,12	19,71	<b>10,10 b</b>
<b>Mesa de tensão</b>	10,72	14,41	14,80	13,80	<b>13,43 a</b>
<b>Sistema de Semeadura Direta</b>					
<b>Análise blocos</b>	10,07	4,26	7,10	7,14	<b>7,14 b</b>
<b>Mesa de tensão</b>	8,50	8,65	12,35	10,71	<b>10,05 a</b>

Letras maiúscula na linha e minúscula na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

## 7.CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos com esta pesquisa pode-se concluir:

O método do anel volumétrico resultou em diferença de densidade do solo entre os sistemas semeadura direta e preparo convencional e o sistema mata, para as camadas de 0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m.

O método da tomografia computadorizada mostrou diferença de densidade do solo entre os sistemas preparo convencional e mata e o sistema semeadura direta, a camada 0-0,20 m.

O método do anel volumétrico superestimou os valores de densidade do solo, nas camadas de 0-0,05 e 0,05- 0,10 m em relação a tomografia computadorizada.

O coeficiente de variação relativo aos valores de densidade do solo foi menor para o método da tomografia computadorizada em comparação ao método do anel volumétrico.

O método da mesa de tensão não resultou em diferenças de macroporosidade entre os sistemas de manejo.

O método da análise de imagem de blocos mostrou diferenças entre os sistemas mata, semeadura direta e sistema de preparo convencional do solo para a camada de 0-0,20 m.

O coeficiente de variação relativo aos valores de macroporosidade foi menor para o método da análise de imagens de blocos em comparação ao método da mesa de tensão.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, A. et al. Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). Cahier ORSTOM, **Série Pédologie**, Paris, v.27, n.1, p.23-36, 1992.

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, p.115-119, 1995.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L. & ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.717-723, 2001.

ANDREUX, F. Humus in world soils. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.45-100.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO CULTIVADO E SOB MATA NATIVA.

**Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.337-345, 2004.

ASAE. Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. St. Joseph: **American Society of Agricultural Engineers**, 1982. p.229-241. (Engineering Practice, EP. 291.1).

AZEVEDO, A.C.; Bonumá, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.609-617, mar-abr, 2004.

BAYER, C. et al. Teores de carbono e nitrogênio total em um solo Podzólico Vermelho-Escuro submetido 9 anos a diferentes sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Resumo expandido...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.2036-2038.

BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-26.

BEARE, M.H. et al. Aggregate-protected and unprotected pools of organic matter in conventional and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.787-795, 1994.

BELTRAME, L.; TAYLOR, J.C. Uso da sonda de nêutrons para determinação da umidade do solo no campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.4, p.57-61, 1980.

BREWER, R. **Fabric and Mineral Analysis of Soils**. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntington, New York, 1976. 482p.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. & TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Waine Research, Albrington, UK, 1985. 152p.

CANALLI, L.B.; ROLOFF, G. Influência do preparo e da correção do solo na condição hídrica de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.21, p.99-104, 1997.

CARVALHO, W.A.; ESPÍNOLA, C.R.; PACCOLA, A.A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médici”. **Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agronômicas**, Botucatu, v.1, 95p., 1983.

CATTELAN, A.J.; GAUDÊNCIO, C.A.; SILVA, T.A. Sistema de rotação de culturas em plantio direto e os microrganismos do solo, na cultura da soja em Londrina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.293-301, 1997.

CERETA, C.A. **Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistemas de culturas sob plantio direto**. 127 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**, 1999. 149p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; FONTOURA, S.M.V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, mar-abr, 2004.

COSTA, F.S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.527-535, 2003.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computerized tomographic scanning. **Soil Science**, v.140, n.5, p.326-332, 1985.

CRESTANA, S. et al. Estudos preliminares da broca da cana-de-açúcar através do uso da tomografia computadorizada. In: ESCUELA LATINOAMERICANA DE FISICA DE SUELOS, 1., 1988, São Carlos. **Anais...**, São Carlos: EMBRAPA-CNPDI, 1988. Paginação irregular.

CRESTANA, S. et al. Tomografia reconstitutiva. In: CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C.I.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L.A., ed. **Instrumentação agropecuária: contribuição no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, cap.4, 1996. p.152-200.

DE MARIA, I.C. Erosão e terraços em plantio direto. **Boletim Informativo** – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 24, nº 3, p. 17-22, 1999.

DENARDIN, J. E. Manejo adequado do solo para áreas motomecanizadas. In: SIMPÓSIO DE MANEJO DO SOLO E PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL, 3., 1984, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: PIUCS, 1984. p. 107-124.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: CNPSo, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

FANTE JÚNIOR, L. et al. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.26, p.835-842, 2002.

FREITAS, de, P.L. et al. Nível e natureza do estoque orgânico de LATOSSOLOS sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35, n.1, p.157-170, jan.2000.

HAINSWORTH, J.M.; AYLMOORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Resesearch**, v.21, p.1435,1983.

HENDEE, W.R. X-rays in medicine. **Physics Today**, v.48, n.11, p.51-56, 1995.

KALPAGÉ, F.S.C.P. **Tropical soils**: classification, fertility and management. London, Macmillan, 1976. 283 p.

HORGAN, G.W. Mathematical morphology for analysing soil structure from images. **European Journal of Soil Science**, v.49, p.161-173. 1998.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, dez. 1998.

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

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

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

KIEHL, J.E. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KUBIENA, W.L. **Micropedology**. Collegiate Press Inc., Ames, Iowa. 1938.

LAL, R. Tillage and agricultural sustainability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.21, p.133-146, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. Soil Sci.**, v.1, p.277-294, 1985.

MACEDO, A. et al. Construção e uso de um tomógrafo para investigação do interior de amostras com resolução micrométrica. **XIX – Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**. p.72-79. Águas de Lindóia-SP, 1996.

MACEDO, A.; et al. Tomografia computadorizada na avaliação da qualidade física do solo. In: MORAES, M.H. et al. **Qualidade física do solo: métodos de estudo-sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p.47-73.

MANTOVANI, E.C. Técnicas de avaliação da compactação dos solos. XIV REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 2002, Cuiabá-MT, **Anais...**, Cuiabá-MT, 2002. 1 CD-ROM.

MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A. R.; ALSON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. **Plant Soil**, v.135, p.31-41, 1991.

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

NAIME, J. de M. **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de ciência do solo e plantas, em campo**. 1994. 87p. (Dissertação) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

NAIME, J. de M. et al. **Applications of X and  $\gamma$ - Rays dedicated computerized tomography scanner in agriculture**. Advances in Agricultural Tomography, Embrapa Agricultural Instrumentation, São Carlos, Brasil, 2000, p.96-104.

OLIVEIRA, G.C. de et al. 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, fev. p.291-299, 2003.

OLSZEWSKI, N. et al. Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.901-909, 2004.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S. Avaliação da densidade pelo método da tomografia computadorizada de um PLANOSSOLO sob diferentes sistemas de manejo. **XIII Congresso Latino Americano de Ciência do Solo**. p.1-4, 1996. Águas de Lindóia-SP.

PEDROTTI, A. et al. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.521-529, 2001.

PEDROTTI, A. et al. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.7, p.819-826, jul.2003.

PEÑA, Y.A.; GOMES, A.S. da; SOUSA, R.O. Influência de diferentes sistemas de cultivo nas propriedades físicas de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.517-523, 1996.

PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.445-449, 1982.

RAIJ, B. van. et al. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

RAIJ, B.van et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim Técnico do Instituto Agrônômico**, Campinas, n.100, 2 ed., 285p., 1997.

RINGROSE-VOASE, A.J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Aust. J. Soil Res.**, Melbourne, v.29, n.6, p.777-813, 1991.

ROS, C.O. da et al. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.241-247, 1997.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p.259-266, 1994.

SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre: Genesis, 1999. 491 p.

SCHAEFER, C.E.G.R. et al. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.765-769, 2001.

SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology.** Academic Press, London, 610p. 1982

SIDIRAS, N.; HENKLAIN, J.C.; DERPSCH, R. Comparison of three different tillage systems with respect to aggregate stability, the soil and water conservation and the yields of soybean and wheat on an oxisol. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION, 9., 1982, Osijek. **Conference...** Osijek, p.537-544.

SILVA, A.P. A água e a qualidade física do solo para o crescimento das plantas. XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação de Solo e Água, 2002, Cuiabá-MT, **Anais...** Cuiabá, 2002. 1 CD-ROM.

SILVA, R.H. da; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, jun., p. 855-860, 2002.

SILVA, J.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.313-319, 1997.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.2485-2492, 2000.

SILVA, R.H. da; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, jun., p.855-860, 2002.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um LATOSSOLO Vermelho-escuro e de um Podzólico Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.239-249, 2000.

SOUZA, Z.M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, em Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.699-707, 2001.

STOOPS, G.; JONGERIUS, A. Proposal for a micromorphological classification in soil materials. I. A classification of the related distributions of coarse and fine particles. **Geoderma**, v. 13, p. 189-200. 1975

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um LATOSSOLO ROXO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.25, p.725-730, 2001.

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.

VAZ, C.M.P. **Tomografia computadorizada aplicada a estudos de compactação de solo**. 1989. 110 fls. (Dissertação) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Teste de máxima compactação do solo avaliado pela tomografia computadorizada. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 18, 1990, Nova Friburgo, RJ. **Anais...**Nova Friburgo: Colégio Anchieta, 1990.

VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.153-159, 1992.

VOORHEES, W.B.; LINDSTRON, M.J. Long term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, v.48, p.152-156, 1984.

VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Plantio direto no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1981. cap.2, p.19-32. (Circular, 23).

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