

**MARLON JULIÁN CASTAÑEDA SERRANO**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE AGREGADOS DE  
LATOSSOLOS VERMELHOS SOB DISTINTOS SISTEMAS DE USO E  
MANEJO**

**MARINGÁ  
PARANÁ - BRASIL  
MARÇO - 2012**

**MARLON JULIÁN CASTAÑEDA SERRANO**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE AGREGADOS DE  
LATOSSOLOS VERMELHOS SOB DISTINTOS SISTEMAS DE USO E  
MANEJO**

**Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.**

**MARINGÁ  
PARANÁ - BRASIL  
MARÇO - 2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

C346a Castañeda Serrano, Marlon Julián  
Atributos físicos e mecânicos de agregados de latossolos vermelhos sob distintos sistemas de uso e manejo / Marlon Julián Castañeda Serrano. -- Maringá, 2012.  
iii-xvii, 71 f. : il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena.  
Co-orientador: Prof. Dr. Getúlio Coutinho Figueiredo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2012.

1. Latossolo Vermelho distroférico - Qualidade física. 2. Solos - Qualidade estrutural. 3. Resistência tênsil de agregados - Qualidade física do solo. 4. Friabilidade do solo - Qualidade física do solo. 5. Plantio direto. 6. Manejo do solo. 7. Solo - Qualidade física - Indicadores. I. Tormena, Cássio Antonio, orient. II. Figueiredo, Getúlio Coutinho, co-orient. III. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDD 21. ed. 631.43

MN-0000492

**MARLON JULIÁN CASTAÑEDA SERRANO**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE AGREGADOS DE  
LATOSSOLOS VERMELHOS SOB DISTINTOS SISTEMAS DE USO E  
MANEJO**

Aprovada em 09 de março 2012.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Getúlio Coutinho Figueiredo  
(Coorientador)

---

Prof. Dr. José de Deus Viana da Mata

---

Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena  
(Orientador)

**"A ciência é a alma da prosperidade das nações e a fonte de vida de todo progresso"**

**(LOUIS PASTEUR, 1822-1895)**

Aos meus pais,

Julio Castañeda Pérez e Carmen Rosa Serrano Cely,  
pela vida, amor, apoio e dedicação incondicional sempre;

Aos meus irmãos,

Román David, Sergio Giovanni, Cristian Santiago e Natalia,  
pela amizade e motivação;

A minha sobrinha,

Valeria Castañeda Peñuela,  
pela energia e amor, desde meu primeiro dia no Brasil;

A minha cidade e a minha grande nação,

Corrales, Departamento de Boyacá, Colômbia,  
porque sempre estão no meu coração;

A minha noiva,

Lina Yurany Niño Supanteve,  
pelo apoio e dedicação sempre e por fazer minha vida ainda mais  
feliz.

DEDICO...

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar ao meu lado, sempre;

Ao Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena, pela extraordinária orientação nestes quase três anos de convivência, pelos conselhos, pela confiança depositada e por ser exemplo de honestidade e integridade;

À Universidade Estadual de Maringá, por me dar a possibilidade de realizar este trabalho;

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e seus professores, pelos ensinamentos que permanecerão comigo, por toda a vida;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos;

Aos graduandos, Hélio Henrique Soares Franco e Camila Jorge Barnabé Ferreira, ao laboratorista Reinaldo Bernardo e ao doutorando Marco Aurélio Teixeira, pela amizade incondicional desde o primeiro dia e pelo acolhimento nesta terra;

Aos mestrandos, Edner Betioli Júnior, Wagner Henrique Moreira e Renata Guimarães, e aos graduandos Guilherme Anghinoni, Rafael Palonbino, pela amizade, companheirismo e ajuda sem os quais não seria possível a realização deste trabalho;

À funcionária da Secretaria do PGA, Érika C. T. Sato, e funcionários dos laboratórios de Química e Fertilidade do Solo (Silvia, Ivan, Anderson e Roberto).

Aos queridos amigos, que compartilharam esta grandiosa etapa de minha vida, em especial: Lina Maria Peñuela, Jorge Cleto e Elisangela Mendes.

## BIOGRAFIA

**Marlon Julián Castañeda Serrano**, filho de Julio Castañeda Pérez e Carmen Rosa Serrano Cely, nasceu no município de Corrales, Departamento de Boyacá, Colômbia, no dia 02 de novembro de 1983. Em novembro de 2000, concluiu seus estudos de ensino médio, recebendo o título de Bachiller Técnico em Informática, pelo Colégio Técnico Nacionalizado de Corrales, Departamento de Boyacá, Colômbia. Em julho de 2008, formou-se em Engenharia Florestal, pela Universidad Del Tolima - UT, Ibagué, Departamento de Tolima, Colômbia. De maio de 2007 a maio de 2008, realizou seu ano de serviço social ou estágio profissional de conclusão de curso, na empresa siderúrgica Acerías Paz Del Rio S.A., localizada no município de Nobsa, Departamento de Boyacá, Colômbia, sendo esta de propriedade do grupo econômico VOTORANTIM - Brasil. Na sua vida acadêmica e profissional em 2009, realizou estágio internacional voluntário no laboratório de Física de Solos do programa de Pós-Graduação em Agronomia na Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá, Estado do Paraná, Brasil. Em março de 2010, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, em nível de Mestrado, Área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Estadual de Maringá - UEM, Maringá, Estado do Paraná, Brasil. No período compreendido entre setembro 2010 e março 2012, foi bolsista de projeto de pesquisa, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), realizando estudos na área de Física e Manejo de Solos. No dia 09 de março de 2012, submeteu-se à banca examinadora para a defesa da Dissertação de Mestrado.

## ÍNDICE

Página

|  |     |
|--|-----|
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....  | xi  |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....  | xii |
| <b>RESUMO GERAL</b> .....  | xiv |
| <b>GENERAL ABSTRACT</b> .....  | xvi |
| <b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....   | 1   |
| 1.1 Resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo .....   | 1   |
| 1.2 Densidade de agregados do solo .....   | 4   |
| 1.3 Carbono orgânico do solo.....  | 4   |
| <b>CAPÍTULO 1. ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DOS<br/>AGREGADOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO<br/>DISTROFÉRRICO SOB PASTAGEM, PLANTIO DIRETO E<br/>FLORESTA NATIVA</b> ..... | 7   |
| <b>RESUMO</b> .....  | 7   |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 8   |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | 8   |
| <b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | 11  |
| 2.1 Área experimental e descrição de manejo do solo .....  | 11  |
| 2.2 Amostras de solo e preparação de agregados do solo .....   | 12  |
| 2.3 Determinação da resistência tênsil de agregados (RT) .....   | 12  |
| 2.4 Estimativa da friabilidade do solo (F) .....   | 13  |
| 2.5 Determinação da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ).....   | 14  |
| 2.6 Determinação do carbono orgânico do solo (COS) .....   | 14  |
| 2.7 Análise estatística.....   | 14  |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | 15  |
| 3.1 Momentos estatísticos .....  | 15  |
| 3.2 Resistência tênsil de agregados (RT) .....   | 16  |
| 3.3 Friabilidade do solo (F) .....   | 18  |
| 3.4 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) .....  | 19  |
| 3.5 Carbono orgânico do solo (COS).....  | 20  |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.6 Inter-relações entre a resistência tênsil de agregados (RT) e o carbono orgânico do solo (COS) nas diferentes classes de diâmetro dos agregados do solo .....   | 21        |
| 3.7 Superfície de resposta da relação do carbono orgânico do solo (COS) e a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) sobre a resistência tênsil de agregados da classe de diâmetro 19 – 25 mm.....                 | 22        |
| <b>4. CONCLUSÕES .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>CAPÍTULO 2. INFLUÊNCIA DE POSIÇÕES DE AMOSTRAGEM NA RESISTÊNCIA TÊNSIL, DENSIDADE E CARBONO ORGÂNICO DE AGREGADOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO SOB LONGO TEMPO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO .....</b> | <b>24</b> |
| <b>RESUMO .....</b>   | <b>24</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>2. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>   | <b>28</b> |
| 2.1 Área experimental e descrição de manejo do solo.....  | 28        |
| 2.2 Amostragem e preparação de agregados do solo.....   | 30        |
| 2.3 Determinação da resistência tênsil de agregados (RT) .....  | 31        |
| 2.4 Estimativa da friabilidade do solo (F) .....  | 32        |
| 2.5 Determinação da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ).....  | 32        |
| 2.6 Determinação do carbono orgânico do solo (COS) .....  | 33        |
| 2.7 Análise estatística.....  | 33        |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>33</b> |
| 3.1 Momentos estatísticos .....   | 33        |
| 3.2 Resistência tênsil de agregados (RT) .....  | 34        |
| 3.3 Friabilidade do solo (F) .....  | 36        |
| 3.4 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) .....   | 37        |
| 3.5 Carbono orgânico do solo (COS).....   | 38        |
| 3.6 Inter-relações entre resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade do solo (F), densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e carbono orgânico do solo (COS) ...   | 39        |

|  |    |
|--|----|
| <b>4. CONCLUSÕES</b> .....   | 40 |
| <b>CAPÍTULO 3. ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE DIFERENTES TAMANHOS DE AGREGADOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO E FLORESTA NATIVA</b> .....                     | 41 |
| <b>RESUMO</b> .....  | 41 |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 42 |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | 43 |
| <b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | 46 |
| 2.1 Área experimental e descrição de manejo do solo .....  | 46 |
| 2.2 Amostras de solo e preparação de agregados do solo .....   | 47 |
| 2.3 Determinação da resistência tênsil de agregados (RT) .....   | 48 |
| 2.4 Estimativa da friabilidade do solo (F) .....   | 49 |
| 2.5 Determinação da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) .....  | 49 |
| 2.6 Determinação do carbono orgânico do solo (COS) .....   | 50 |
| 2.7 Análise estatística .....  | 50 |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | 50 |
| 3.1 Momentos estatísticos .....  | 50 |
| 3.2 Resistência tênsil de agregados (RT) .....   | 51 |
| 3.3 Friabilidade do solo (F) .....   | 54 |
| 3.4 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) .....  | 56 |
| 3.5 Carbono orgânico do solo (COS) .....   | 57 |
| 3.6 Inter-relações entre a resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade do solo (F), densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e o carbono orgânico do solo (COS).59                           |    |
| 3.7 Superfície resposta relação do carbono orgânico do solo (COS) e da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) sobre a resistência tênsil de agregados (RT) da classe de diâmetro 16 - 19 mm ..... | 60 |
| <b>4. CONCLUSÕES</b> .....   | 61 |
| <b>CONCLUSÕES GERAIS</b> .....   | 62 |
| <b>LITERATURA CITADA</b> .....   | 63 |

## LISTA DE TABELAS

Página

### CAPÍTULO 1

Tabela 1. Momentos estatísticos da resistência tênsil de agregados (RT) e do carbono orgânico do solo (COS) independentemente dos sistemas de manejo plantio direto, pastagem e floresta nativa e classes de diâmetro dos agregados (2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm) utilizadas neste estudo..... 15

Tabela 2. Valores de Friabilidade estimados para agregados com diâmetros entre 19-25 mm nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa ..... 18

Tabela 3. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a resistência tênsil dos agregados (RT) e o carbono orgânico do solo (COS) para diferentes classes de diâmetro dos agregados utilizadas neste estudo ..... 21

### CAPÍTULO 2.

Tabela 1. Momentos estatísticos e coeficientes dos testes de normalidade e homocedasticidade da resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade do solo (F), densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e carbono orgânico do solo (COS) independentemente da posição de amostragem linha, ponto intermediário e entrelinha ..... 34

Tabela 2. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade do solo (F), densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e carbono orgânico do solo (COS) para classe de diâmetro de agregados de 12.5-19 mm, para as duas camadas estudadas..... 39

### CAPÍTULO 3.

Tabela 1. Momentos estatísticos da resistência tênsil de agregados (RT) e do carbono orgânico do solo (COS) independentemente dos sistemas de manejo plantio direto e floresta nativa para as classes de diâmetro de agregados (2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm) utilizadas neste estudo.. ..... 51

Tabela 2. Valores de Friabilidade estimados para agregados com diâmetros entre 16-19 mm nos tratamentos plantio direto e floresta nativa..... 55

Tabela 3. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a resistência tênsil de agregados (RT), a friabilidade do solo (F), a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e o carbono orgânico do solo (COS) para as classes de diâmetro de agregados utilizadas na camada 0-10 e 10-20 cm de profundidade.. ..... 59

## LISTA DE FIGURAS

Página

### **CAPÍTULO 1.**

Figura 1. Valores médios da resistência tênsil para classes de diâmetro de agregados nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa ..... 16

Figura 2. Valores médios da densidade de agregados nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa..... 19

Figura 3. Valores médios do carbono orgânico do solo nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa ..... 20

Figura 4. Influência do carbono orgânico do solo e a densidade de agregados sobre a resistência tênsil de agregados da classe de diâmetro 19-25 mm..... 22

### **CAPÍTULO 2.**

Figura 1. Vista panorâmica da área agrícola comercial amostrada ..... 29

Figura 2. Esquema de coleta das amostras com estrutura indeformada num Latossolo Vermelho distroférico ao longo de um traçado perpendicular às linhas de cultivo, nas posições de amostragem linha, ponto intermediário e entrelinha..... 30

Figura 3. Valores médios da resistência tênsil de agregados nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha..... 35

Figura 4. Valores médios da friabilidade do solo nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha ..... 36

Figura 5. Valor médio da densidade de agregados nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha ..... 37

Figura 6. Valores médios do carbono orgânico do solo (COS) nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha..... 38

### **CAPÍTULO 3.**

Figura 1. Vista panorâmica da área agrícola comercial e floresta nativa..... 46

|   |    |
|---|----|
| Figura 2. Valores médios da resistência tênsil de agregados nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 0-10 cm de profundidade .....  | 52 |
| Figura 3. Valores médios da resistência tênsil de agregados nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 10-20 cm de profundidade ..... | 54 |
| Figura 4. Valores médios da densidade de agregados nos tratamentos, plantio direto e floresta nativa na camada 0-10 cm de profundidade .....          | 56 |
| Figura 5. Valores médios da densidade de agregados nos tratamentos, plantio direto e floresta nativa na camada 10-20 de profundidade.....             | 56 |
| Figura 6. Valores médios do carbono orgânico do solo nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 0-10 cm de profundidade .....         | 58 |
| Figura 7. Valores médios de carbono orgânico do solo nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 10-20 cm de profundidade .....        | 58 |
| Figura 8. Influência do carbono orgânico do solo e densidade de agregados sobre a resistência tênsil de agregados da classe de diâmetro 16-19 mm..... | 60 |

## RESUMO GERAL

CASTAÑEDA, Marlon Julián, Universidade Estadual de Maringá, Março 2012. **Atributos físicos e mecânicos de agregados de latossolos vermelhos sob distintos sistemas de uso e manejo.** Orientador: Professor Doutor Cássio Antonio Tormena. Coorientador: Doutor Getúlio Coutinho Figueiredo.

A implantação de sistemas de uso e manejo influencia a estrutura do solo, alterando atributos físicos e mecânicos de seus agregados individuais. Neste sentido, para melhor compreender estes efeitos, há necessidade de estudar o comportamento físico e mecânico do solo na escala de agregados. Assim, o objetivo foi avaliar, através de agregados individuais, as alterações físicas e estruturais ocorridas em solos sob distintos sistemas de uso e manejo, bem como avaliar a influência de posições de amostragem relativas à linha e entrelinha da cultura num solo sob plantio direto. Com esta finalidade, foram desenvolvidos três estudos em dois solos, pertencentes à classe dos Latossolos, de modo que este trabalho está organizado em três capítulos. O estudo 1 teve como objetivo avaliar o efeito de distintos sistemas de uso e manejo (solo sob plantio direto, pastagem e floresta nativa) sobre alguns atributos físicos (densidade dos agregados -  $\rho_{agg}$ ) e mecânicos (resistência tênsil de agregados - RT e friabilidade do solo - F) de um Latossolo Vermelho distroférico. Também foram feitas medidas do teor de carbono orgânico nos agregados. O estudo 2 teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes posições de amostragem sobre a RT, F, COS e  $\rho_{agg}$  de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto (SPD), por longo tempo. O estudo 3 teve como objetivo avaliar o impacto ao longo prazo do SPD sobre a estrutura do solo, tendo como comparativo um solo sob floresta nativa. Tanto no estudo 1 como no estudo 3, a RT foi avaliada em diferentes classes de diâmetro de agregados enquanto que, no estudo 2, as avaliações foram feitas somente em agregados da classe de diâmetro entre 12,5-19,0 mm. Os resultados indicaram que, conjuntamente à redução do diâmetro dos agregados, ocorreu um acréscimo nos valores da RT. Os maiores valores de RT no solo sob pastagem (estudo 1) decorrem da maior  $\rho_{agg}$ . Na avaliação do efeito relativo da posição de amostragem (estudo 2), os resultados mostraram que na

camada de 0-10 cm, ocorreram os maiores valores de F na posição relativa à linha da cultura, e não houve diferenças de RT entre as posições de amostragem na camada de 0-10 cm. A  $\rho_{agg}$  e COS não se diferenciaram entre as posições de amostragem, distinguindo-se apenas entre as camadas de solo. No solo sob floresta nativa, (estudo 3), os maiores valores de RT são condizentes com o maior teor de COS, provavelmente associado ao efeito cimentante do COS com a redução no tamanho do agregado. De modo geral, observou-se o decréscimo da  $\rho_{agg}$  no solo sob floresta nativa quando comparado ao solo sob SPD, bem como os agregados apresentaram maiores teores de COS, diferindo-se do SPD.

**Palavras-chave:** manejo de solo, resistência tênsil, qualidade do solo, estrutura do solo.

## **GENERAL ABSTRACT: PHYSICAL AND MECHANICAL ATTRIBUTES OF SOIL AGGREGATES UNDER DIFFERENT SOIL USE AND MANAGEMENT SYSTEMS.**

There is a need to assess and study the physical and mechanical behavior of soil at the macroscale and the changes that occur in this structure. The implementation of land use systems and soil management is related to the study of physical and mechanical attributes of individual soil aggregates. Thus, the objective was to study and quantify, through individual aggregates, the physical and structural changes occurring in soils under different land use systems and management as well as evaluating the influence of sampling positions on the row and interrow cultivation on a soil under no-tillage. For this purpose three studies were developed in two soils belonging to the class of Oxisols, so this work is organized into three chapters. The first study aimed to evaluate the effect of different land use and management systems (no-tillage, pasture and native forest) on some physical (density of aggregates -  $\rho_{agg}$ ) and mechanical attributes (tensile strength of aggregates - TS and friability of soil - F) in an Oxisol. Measurements of organic carbon in aggregates were also made. The second study aimed to evaluate the effect of different sampling positions on TS, F, SOC and  $\rho_{agg}$  in an Oxisol under no-tillage (NT). The third study aimed to evaluate the long-term impact of the NT on the soil structure, as a comparison with a soil under native forest. Both the study 1 and 3, TS was evaluated in different sizes of aggregates while in study 2 assessments were made in aggregates with size from 12.5 to 19,0 mm. The results indicated that the reduction of the diameter of the aggregates showed an increase on the values of tensile strength of aggregates (TS). The highest values of TS in pasture result from the higher density of the aggregates. In assessing the relative effect of sampling position, the results showed that at 0-10 cm were the highest values of F in position relative to the crop rows and there were no differences in TS between the sampling positions in the 0 - 10 cm. The  $\rho_{agg}$  and SOC did not differ between the sampling positions, distinguishing only between the layers. In the soil under native forest, study 3, the highest TS values observed are consistent with the highest level of SOC,

probably due to the effect of cement SOC with a reduction in aggregate size. In general, we observed a decrease in the forest soil  $\rho_{agg}$  when compared to native soil under NT as well as aggregates showed higher levels of SOC, differing from the NT.

**Keywords:** soil management, tensile strength, soil quality, soil structure.

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1 Resistência tênsil de agregados (RT) e friabilidade do solo (F)**

A dinâmica estrutural do solo como um todo é definida pela organização e hierarquia de suas unidades estruturais. A implantação de sistemas de uso e manejo do solo está relacionada ao estudo dos atributos físicos e mecânicos de agregados individuais do solo, de modo que há necessidade de avaliar e estudar o comportamento físico e mecânico do solo em macroescala. Desta forma, o entendimento do impacto dos sistemas de uso e manejo sobre as propriedades físicas e mecânicas dos agregados é fundamental para o manejo sustentável do solo. De maneira geral, as avaliações da qualidade estrutural dos solos geralmente são realizadas através do estudo de propriedades, tais como, a densidade e a porosidade do solo (BERTOL et al., 2004), resistência do solo à penetração (TORMENA et al., 1998), e aquelas relacionadas à distribuição dos agregados em tamanhos ou estabilidade (CAMPOS et al., 1999).

No Brasil, atributos físicos e mecânicos como a resistência tênsil de agregados e a friabilidade do solo têm sido pouco estudados, e isto pode ser atribuído a pouca difusão e a instrumentação que facilite a determinação num amplo número de agregados. A resistência tênsil é provavelmente a mais útil medida de resistência individual dos agregados do solo. Ela apresenta grande utilidade porque pode ser determinada por um teste simples, pode ser medida em uma ampla variação de tamanhos de agregados, e é um indicador muito sensível da condição estrutural do solo (DEXTER e KROESBERGEN, 1985). Resistência tênsil é definida como a força por unidade de área necessária para causar o fraturamento dos agregados (DEXTER e WATTS, 2000). A medida da resistência tênsil de agregados pode ser utilizada para avaliar os efeitos dos sistemas de manejo na estrutura do solo, uma vez que os estresses aplicados resultam em fraturamento dos agregados nos planos de fraqueza ou nas zonas de menor resistência. A resistência tênsil do solo é considerada um indicador robusto da condição estrutural do solo (DEXTER e KROESBERGEN, 1985).

Li et al. (2011) definem a resistência tênsil como um importante indicador de estabilidade mecânica dos agregados do solo. Assim, a resistência

tênsil de agregados é extremamente sensível à microestrutura do solo, e isto a torna um valioso parâmetro de medida em estudos do comportamento da estrutura.

Maiores agregados, por exemplo, são sempre quebrados em menores agregados porque contêm maior quantidade de fendas ou microfissuras (DEXTER e WATTS, 2000). Além disso, a resistência tênsil de agregados e a friabilidade do solo são influenciados por diferentes fatores, tais como, conteúdo de água (UTOMO e DEXTER, 1981; CHAN, 1989; WATTS et al., 1996), quantidade de argila dispersa (KAY e DEXTER, 1992; WATTS et al., 1996), concentração e composição da solução do solo (RAHIMI et al., 2000), ciclos de secagem e umedecimento (DEXTER, 1988, MATERECHERA et al., 1992; KAY e Dexter 1992; PENG et al., 2011), estabilidade de agregados (MATERECHERA et al., 1992; MACKS et al., 1996; LI, et al., 2011), conteúdo de argila e mineralogia (KEMPER et al., 1987; IMHOFF et al., 2002), e pelo teor de matéria orgânica do solo (CAUSARANO, 1993; MACKS et al., 1996; RAHIMI et al., 2000; IMHOFF et al., 2002; LI, et al., 2011).

Os sistemas de manejo também podem influenciar a resistência tênsil (TORMENA et al., 2008a, 2008b), via modificações na densidade de agregados, no teor de matéria orgânica ou no teor de argila dispersa. Neste sentido, Tormena et al. (2008a) concluem que a resistência tênsil de agregados é uma medida sensível para a avaliação da qualidade estrutural de solos agrícolas.

A determinação da resistência tênsil de agregados pode ser feita através de testes diretos e indiretos (DEXTER e WATTS, 2000). A determinação da resistência tênsil de agregados (RT), através do teste de tensão indireta, é documentada por Dexter e Kroesbergen (1985). A obtenção da resistência tênsil, através de testes diretos, consiste na aplicação de duas forças de mesma direção e sentido oposto nos extremos de um agregado, o qual é separado em duas partes pela ação dessas forças. Nos testes indiretos, o estresse não é aplicado diretamente sobre o agregado. Nesse caso, uma força compressiva é aplicada a uma placa metálica que transmite a força através do diâmetro polar do agregado, produzindo um aumento do estresse dentro do mesmo. O valor máximo de

estresse tênsil ocorre no plano vertical através do centro da amostra, quando a força compressiva supera a resistência tênsil do agregado (força de mesma magnitude, mas sentido oposto) forma-se uma fissura no centro do agregado, dividindo-o em unidades menores, porém, de maior resistência (DEXTER e WATTS, 2000).

A partir das medidas de resistência tênsil de agregados, pode-se quantificar a friabilidade, outro importante indicador da qualidade estrutural do solo. A heterogeneidade da resistência resultante dos planos de fraqueza ou zonas de falhas dentro dos agregados é identificada como friabilidade do solo (DEXTER e WATTS, 2000). A friabilidade do solo é considerada uma importante propriedade física dos solos agrícolas, uma vez que a condição de solo “friável” é desejável para um adequado estabelecimento das plantas. Maiores valores de friabilidade indicam que agregados maiores possuem resistência tênsil muito menor do que agregados menores e, deste modo, poderão ser quebrados mais facilmente, produzindo uma adequada distribuição do tamanho de agregados por ocasião da semeadura (MACKS et al., 1996). Elevada resistência tênsil de agregados geralmente resulta na dificuldade de penetração das semeadoras no solo, na redução da emergência das plântulas e em restrição ao crescimento das raízes no solo (IMHOFF et al., 2002).

Em sistema de plantio direto, valores elevados de friabilidade foram constatados por Chan (1989) e Macks et al. (1996), os quais atribuíram este efeito às melhores condições estruturais dos solos submetidos a esta prática de manejo. Neste sentido, um precário estabelecimento e crescimento das culturas tem sido associado à elevada resistência tênsil de agregados e baixos valores de friabilidade do solo (LEY et al., 1993). Em semeadura direta, é muito importante que o solo apresente boa qualidade estrutural, para permitir que permita o desenvolvimento de um leito de semeadura composto por uma ampla distribuição de tamanho de agregados. Resultados obtidos por Tormena et al. (2008a) indicam que a friabilidade também pode ser influenciada pelos diferentes sistemas de condução do plantio direto.

## **1.2 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )**

Silva et al. (2003) definem a densidade do solo como um importante atributo físico, o qual fornece indicações a respeito do seu estado físico-mecânico, e é uma das primeiras propriedades a ser alterada pelos sistemas de uso e manejo do solo. Ela pode ser determinada diretamente a partir de agregados do solo, e tem sido utilizada na avaliação de parâmetros nos quais se faz o uso de medidas de volume do solo (MUNKHOLM e KAY, 2002; MUNKHOLM e SCHJØNNING, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2005) devido essa propriedade física ser sensível às modificações na estrutura do solo ocasionadas pelas práticas de manejo.

A  $\rho_{agg}$  é definida pela razão entre a massa de sólidos e o volume do solo (volume dos sólidos mais o espaço poroso). Ela geralmente é 25 % maior do que a densidade do solo, a exemplo de Munkholm e Kay (2002) que observaram maiores valores de densidade do solo quando foi determinada através de agregados. Isso pode ser explicado pela organização hierárquica dos agregados proposta por Dexter (1988), a qual resulta em assumir que há uma redução dos planos de falhas e fissuras com a redução no tamanho dos agregados. Assim, espera-se um aumento na densidade de agregados e na resistência tênsil com a redução do tamanho de agregados do solo, as quais podem ser influenciadas pelas práticas de seu uso e de seus manejos. A  $\rho_{agg}$  pode ser utilizada como indicadora da qualidade física do solo, uma vez que há uma hierarquia bem definida de tamanhos de agregados na estrutura do solo (ALMEIDA, et al., 2009).

## **1.3 Carbono orgânico do solo (COS)**

A matéria orgânica (MO) do solo desempenha um papel importante, pois é determinante para a capacidade de retenção da água e estrutura do solo, e fornece armazenamento ao longo tempo de nutrientes necessários para as plantas, Trumbole (1997). Segundo Peixoto (2008), a MO é considerada um indicador chave da qualidade do solo e pode ser avaliada pelo seu teor de carbono orgânico. De acordo com Machado (2005), o carbono orgânico do solo está

presente na matéria orgânica viva, que corresponde a menos de 4% do carbono orgânico total do solo, e na matéria orgânica morta, que corresponde a maior parte do seu carbono orgânico total (cerca de 98 %).

Segundo Tormena et al. (2004), a matéria orgânica desempenha um papel importante na qualidade do solo para o crescimento das plantas. Sua influência sobre as características do solo e sua sensibilidade às práticas de manejo determinam que esta seja considerada um dos principais parâmetros na avaliação da qualidade do solo (DORAN e PARKIN, 1994). Tormena et al. (2008b), ao avaliarem a qualidade física do solo em diferentes sistemas de uso, verificaram que a diminuição do teor de MO caracterizou a redução da qualidade do solo proporcionalmente à intensidade da sua utilização.

A matéria orgânica tem a capacidade de atuar como agente ligante ou desagregante, dependendo de sua composição química e da presença de outros materiais cimentantes. A influência desse agente depende, também, da natureza das áreas de fratura, que, por sua vez, depende da textura do solo, da qualidade da matéria orgânica e de sua distribuição espacial dentro dos agregados. A matéria orgânica pode ser incorporada dentro de poros muito pequenos, entre as unidades do solo classificadas como “domínios argilosos” e/ou “clouster” (agrupamentos maiores), contribuindo na estabilização de microagregados e, como consequência, incrementando a resistência dos agregados de tamanho maior (SILVA A. et al., 2010). Guimarães et al. (2009) citam que a resistência tênsil dos agregados e a friabilidade podem ser influenciadas pela matéria orgânica do solo e que a mesma pode ser incorporada entre poros pequenos, criando laços entre partículas e aumentando a resistência do solo em agregados de tamanho maior.

Blanco-Canqui et al. (2005) verificaram em solos de clima temperado, inter-relações entre atributos físicos e o teor de carbono orgânico do solo, apesar das divergências encontradas por outros autores.

Neste trabalho, estabeleceu-se a hipótese de que a estrutura dos solos é modificada pelos sistemas de manejo, e pode ser identificada pelas medidas da resistência tênsil dos agregados e da densidade dos agregados, sendo estes

atributos físicos e mecânicos indicadores sensíveis da qualidade do solo. Assim, o objetivo foi avaliar, através de agregados individuais, as alterações físicas e estruturais ocorridas em solos sob distintos sistemas de uso e manejo; também avaliar a influência de posições de amostragem sobre alguns atributos físicos e mecânicos dos agregados num solo, sob plantio direto após longo tempo de implantação. Os objetivos específicos foram: a) quantificar a resistência tênsil dos agregados (RT) e friabilidade do solo (F), de diferentes classes de diâmetro dos agregados em diferentes sistemas de uso e manejo do solo; b) avaliar o efeito das posições de amostragem sob os atributos físicos e mecânicos de agregados do solo; c) determinar a densidade de agregados da classe de diâmetro 12,5-19,0; 16-19 e 19-25 mm bem como o teor de carbono orgânico dos agregados; e d) estabelecer relações entre a resistência tênsil de agregados, a densidade de agregados e o teor de carbono orgânico do solo de agregados.

O presente trabalho é organizado em três capítulos, sendo assim descritos:

Capítulo I - Atributos físicos e mecânicos de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, pastagem e floresta nativa;

Capítulo II - Influência de posições de amostragem na resistência tênsil, densidade e carbono orgânico de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico sob longo tempo em sistema de plantio direto; e

Capítulo III - Atributos físicos e mecânicos de diferentes tamanhos de agregados de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto e floresta nativa.

Desta maneira, alguma sobreposição entre os capítulos é inevitável.

## II. CAPÍTULO 1 - ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE AGREGADOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB PASTAGEM, PLANTIO DIRETO E FLORESTA NATIVA

### RESUMO

A introdução de sistemas agropecuários, em substituição aos espaços naturais, modifica as propriedades físicas do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes sistemas de uso e manejo sobre a RT, F e  $\rho_{agg}$  de um Latossolo Vermelho distroférico. A amostragem de solo foi conduzida em janeiro 2010, na Fazenda Experimental da Cooperativa Agroindustrial Mourãoense, COAMO, localizada no município de Campo Mourão, Estado do Paraná, em três áreas contíguas sob pastagem em sistema de manejo intensivo, plantio direto cultivado com culturas anuais e floresta nativa. A amostragem do solo consistiu da coleta de doze blocos (15 x 20 x 10 cm), na profundidade de 0-15 cm. No laboratório, foram obtidos agregados naturais nas seguintes classes de diâmetro: 2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm, nos quais se determinou a resistência tênsil de agregados (RT). A friabilidade do solo (F) foi estimada a partir da RT com diâmetros entre 19-25 mm. Determinou-se também a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) para a classe de diâmetros 19-25 mm e o teor de carbono orgânico do solo (COS) para todas as classes de diâmetros estudados. Os resultados indicaram que, conjuntamente à redução do diâmetro dos agregados, ocorreu um acréscimo nos valores da RT, cuja magnitude foi maior para agregados entre 2 e 8 mm, no solo sob pastagem. Os maiores valores de RT no solo sob pastagem estão em acordo com a maior  $\rho_{agg}$  também verificada neste sistema de manejo. De modo geral, observou-se o decréscimo da  $\rho_{agg}$  no solo sob floresta nativa quando comparado aos solos cultivados. No solo sob floresta nativa, os agregados apresentaram maiores teores COS, diferindo-se dos outros sistemas de uso. Independente dos sistemas de uso e manejo, o solo foi classificado como friável ou muito friável.

**Palavras chaves:** agregados, estrutura do solo, compactação, qualidade do solo.

## ABSTRACT

The introduction of farming systems to replace natural areas changes the physical properties of soil. The objective of this study was to evaluate the effect of different land use systems and management on some physical and mechanical properties of aggregates in an Oxisol. Soil sampling was conducted at the Experimental Farm Cooperative Agroindustrial Mourãoense, COAMO, located in the city of Campo Mourão, State of Paraná, Brazil. Soil samples were obtained in three contiguous areas under pasture management system, no-tillage and native forest. Four blocks of soil were taken randomly in each treatment, at the 0-15 cm layer. Natural aggregates were selected in the following diameter classes: 2-4, 4-8, 8-16, 16-19 and 19-25 mm, in which were determined the tensile strength of aggregates (TS). The friability of the soil (F) was estimated from the TS measured in aggregates diameter class of 19-25 mm. We also determined the density of aggregates ( $\rho_{agg}$ ) for the class of 19-25 mm diameter and the soil organic carbon (SOC) for all diameter classes. The results suggest that TS increased with the reduction of the diameter of the aggregates whose magnitude was greater for aggregates between 2 and 8 mm in the soil under native forest. The highest values of TS in the soil under pasture are in agreement with higher  $\rho_{agg}$  values also verified this management system. Overall, there was a decrease in the  $\rho_{agg}$  under native forest compared to cultivated soils. In native forest, the aggregates had higher levels SOC, differing from the other soil use and management systems. Regardless of the use and management systems, the soil was classified as friable or very friable.

**Key-words:** aggregates, soil structure, compaction, soil quality.

## 1. INTRODUÇÃO

O desequilíbrio originado no ecossistema, decorrente da introdução de sistemas agropecuários em substituição às florestas, causa modificações nas propriedades do solo, culminando em perdas de sua qualidade (MULLER et al., 2001; ARAÚJO et al., 2004; ARATANI et al., 2009). Em sistemas agropecuários como pastagens e plantio direto, os impactos da degradação física dos solos estão relacionados às forças mecânicas resultantes do pisoteio de animais (DONKOR

et al., 2001; MULLER et al., 2001) e do tráfego de máquinas e implementos agrícolas (SILVA et al., 2003; STRECK et al., 2004).

Segundo Imhoff et al. (2000), a redução da produtividade e longevidade das pastagens pode ser atribuída à compactação causada pelo pisoteio dos animais em pastejo, sendo este efeito potencializado sob condições de elevada umidade do solo (DONKOR et al., 2001; LIMA et al., 2004) e emprego de lotação animal excedente (LEÃO et al., 2004; PETEAN et al., 2010). No sistema de plantio direto, embora a movimentação do solo esteja restrita à linha de semeadura, a ausência de revolvimento, aliada ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas pode promover a compactação excessiva do solo em superfície (STONE e SILVEIRA, 2001). Tormena et al. (2008b) ressaltam que a compactação das camadas superficiais nos solos de textura argilosa e muito argilosa é tida como uma das preocupações para o manejo do solo neste sistema de uso.

O comprometimento da qualidade física e estrutural do solo, resultante de práticas de uso e manejo inadequadas, afeta a distribuição e morfologia das raízes das plantas no perfil do solo (LETEY, 1985; REINERT et al., 2008), com reflexos diretos na produção de matéria seca da parte aérea (BEUTLER e CENTURION, 2003). Dessa forma, a compreensão e a avaliação do impacto do uso e manejo na qualidade do solo são importantes para a seleção e desenvolvimento dos sistemas agropecuários.

Avaliações da qualidade física e estrutural do solo podem ser realizadas por meio do estudo de agregados individuais (DEXTER, 1988; HORN, 1990; BLANCO-CANQUI et al., 2007), uma vez que o comportamento do solo na macroescala depende das propriedades físicas e mecânicas e da organização hierárquica dessas unidades estruturais. O tamanho do agregado determina as dimensões do espaço poroso, interferindo diretamente na movimentação e distribuição da água e ar no solo e, indiretamente, no crescimento das plantas (KEMPER e CHEPIL, 1965). Assim, RT, F e  $\rho_{agg}$  são consideradas indicadores dos efeitos do manejo na qualidade do solo.

Dexter e Watts (2000) definiram a RT como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos agregados. Segundo Dexter e Kroesbergen (1985), a RT é provavelmente a mais útil medida de resistência individual de agregados do solo, porque ela pode ser determinada por um teste simples numa ampla variação de tamanhos de agregados e por consistir em um indicador muito sensível à condição estrutural do solo. Vários fatores influenciam a RT, como a umidade do solo (UTOMO e DEXTER, 1981), composição química e concentração da solução do solo (RAHIMI et al., 2000, MOSADDEGHI et al., 2006), ciclos de umedecimento e secamento (KAY e DEXTER, 1992; PENG et al., 2011), teor de argila e mineralogia (IMHOFF et al., 2002), teor de argila dispersa (SHANMUGANATHAN e OADES, 1982; KAY e DEXTER, 1992) e matéria orgânica do solo (ZHANG, 1994; BAVOSO et al., 2010; FERREIRA et al., 2011; LI et al., 2011).

A heterogeneidade da RT, resultante dos planos de fraqueza ou zonas de falhas dentro dos agregados, tem sido identificada como F (DEXTER e WATTS, 2000). De acordo com Watts e Dexter (1998), a F é considerada importante propriedade física dos solos, uma vez que a condição de friabilidade é desejável para o adequado estabelecimento das plantas. A F tem sido estimada pelo método do coeficiente de variação da RT (WATTS e DEXTER, 1998; IMHOFF et al., 2002; TORMENA et al., 2008a, 2008b; BAVOSO et al., 2010). Segundo Dexter e Watts (2000), o método em questão é vantajoso, pois a F pode ser estimada para apenas um tamanho de amostra, sendo facilmente calculada.

A  $\rho_{agg}$  tem sido utilizada na avaliação de parâmetros nos quais se faz o uso de medidas de volume do solo (MUNKHOLM e KAY, 2002; MUNKHOLM e SCHJØNNING, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2005), devido essa propriedade física ser sensível às modificações da estrutura do solo ocasionadas pelas práticas de manejo. Munkholm e Kay (2002) observaram maiores valores de densidade do solo, quando foi determinada através de agregados, sendo que Blanco-Canqui et al. (2005) constataram significativa correlação entre a  $\rho_{agg}$ , a RT e o COS.

Guimarães et al. (2009) citam que a resistência tênsil de agregados e a friabilidade do solo podem ser influenciadas pela matéria orgânica do solo e que a mesma pode ser incorporada em poros pequenos, criando laços entre partículas e aumentando a resistência do solo em agregados de tamanho maior.

Blanco-Canqui et al. (2005) verificaram, em solos de clima temperado, inter-relações entre atributos físicos e teor de carbono orgânico do solo, apesar das divergências encontradas por outros autores. Neste contexto, estabeleceu-se a hipótese de que, para uma mesma classe de solo, práticas de manejo afetam atributos físicos e mecânicos de agregados, sendo estes atributos indicadores sensíveis da qualidade do solo. Assim, objetivou-se avaliar o efeito de diferentes sistemas de uso e manejo sobre a RT, F, e  $\rho_{agg}$  num Latossolo Vermelho distroférico.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Área experimental e descrição de manejo do solo**

Este trabalho foi realizado na Fazenda Experimental da Cooperativa Agroindustrial Mourãoense, COAMO, localizada no município de Campo Mourão, Estado do Paraná (24°02'38" S e 52°22'40" W). Segundo a classificação de Köppen (EMBRAPA, 1984), o clima é caracterizado como Cfa, mesotérmico úmido, com precipitações anuais de 1.340 mm, abundantes no verão e inverno seco. O solo é identificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), (EMBRAPA, 2006), com teores médios de 850 g kg<sup>-1</sup> de argila, 120 g kg<sup>-1</sup> de silte e 30 g kg<sup>-1</sup> de areia na camada superficial, enquadrando-se na classe textural muito argilosa.

Selecionaram-se três áreas contíguas: solo sob pastagem de gramínea em sistema de manejo intensivo; solo agrícola cultivado por mais de vinte anos com culturas anuais em sistema de plantio direto; e solo sob floresta nativa estacional semidecidual. Esses sistemas de uso do solo foram denominados de tratamentos pastagem, plantio direto e floresta nativa.

## **2.2 Amostras do solo e preparação de agregados do solo**

A amostragem de solo foi conduzida em janeiro de 2010 em três áreas contíguas sob pastagem, sistema plantio direto (SPD) e floresta nativa. A amostragem do solo consistiu em abertura aleatória de 12 mini-trincheiras, nas quais foram amostrados, doze blocos de solo (15x 20 x 10 cm de altura, comprimento e largura, respectivamente), na camada de 0-15 cm de profundidade. Os blocos de solo foram identificados e envolvidos, individualmente, em filmes plásticos, para a manutenção da umidade e da integridade estrutural da amostra. Em laboratório, os blocos de solo foram fragmentados manualmente em seus agregados naturais, sendo classificados através de peneiras metálicas com abertura de malha entre os seguintes diâmetros: 2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm. Durante o processo de fragmentação dos agregados, tomou-se o cuidado de se estabelecer a força mínima necessária para que eles se fragmentassem em seus pontos de fraqueza pré-existentes. Os agregados foram secos ao ar, por (36 h), e em estufa (à temperatura de 60 °C por 24 h), para secagem final e homogeneização da umidade, e acondicionados em caixas plásticas devidamente identificadas.

## **2.3 Determinação da resistência tênsil de agregados (RT)**

A resistência tênsil de agregados individual foi determinada usando o método indireto (DEXTER e KROESBERGEN, 1985; DEXTER e WATTS, 2000). Um total de 1500 agregados (3 tratamentos X 4 repetições X 20 agregados por repetição X 1 profundidade X 4 classes de diâmetro: 2-4; 4-8; 8-16; e 16-19 mm) + (3 tratamentos X 4 repetições X 45 agregados por repetição X 1 profundidade X 1 classe de diâmetro; 19-25 mm) foi utilizado para o teste indireto de RT, conforme metodologias encontradas em Tormena et al. (2008a, 2008b). Cada agregado foi pesado em balança analítica e, em seguida, submetido, individualmente, a um teste de tensão indireta, a uma velocidade constante de 1,55 mm s<sup>-1</sup>, e com controle automatizado, sendo utilizado um dinamômetro digital eletrônico de precisão, composto por célula de carga com carga nominal de 20 kgf. O aparelho utilizado para este estudo é descrito por

FIGUEIREDO et al. (2011). As medidas foram determinadas em agregados colocados na posição mais estável, sendo visível a formação de uma fissura contínua ao longo do diâmetro polar do agregado, após a aplicação da carga compressiva.

A RT foi calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576(P/D^2) \quad (1)$$

Onde RT é a resistência tênsil, usualmente representada em kPa; 0,576, o coeficiente de proporcionalidade que reflete a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P, a força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); e D, o diâmetro efetivo (m).

O diâmetro efetivo(D) foi calculado conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$D = D_m (M/M_0)^{1/3} \quad (2)$$

Onde  $D_m$  é o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média do tamanho das peneiras utilizadas para selecionar os agregados; M é a massa do agregado individual (g);  $M_0$ , a massa média dos agregados em cada tratamento (g). No final de cada teste da RT, uma subamostra dos agregados de cada amostra foi utilizada para determinação da umidade residual do solo.

#### 2.4 Estimativa da friabilidade do solo (F)

A F foi estimada através de agregados da classe de diâmetros 19-25 mm, pelo método do coeficiente de variação proposto por Watts e Dexter (1998). Neste método, os valores F são obtidos através do coeficiente de variação dos valores medidos de RT em cada tratamento:

$$F = \frac{\sigma Y}{Y} \pm \frac{\sigma Y}{Y \sqrt{2n}} \quad (3)$$

Em que F é a friabilidade do solo;  $\sigma Y$ , o desvio-padrão dos valores medidos da RT; Y, a média dos valores medidos de RT; e n, o número de repetições. O segundo termo é o erro-padrão do coeficiente de variação. As classes de friabilidade utilizadas neste trabalho foram tomadas com base nos valores de F

(adimensional) propostos por Imhoff et al. (2002): não friável (< 0,10), ligeiramente friável (0,10–0,20), friável (0,20–0,50), muito friável (0,50–0,80) e mecanicamente instável (> 0,80).

## **2.5 Determinação da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )**

A densidade de agregados individuais foi determinada usando o método do torrão impermeabilizado, segundo Grossman e Reinsch (2002), utilizando verniz automotivo como substância impermeabilizante, em metodologia sugerida por Almeida et al. (2009). Um total de 180 agregados (3 tratamentos X 15 agregados X 4 repetições X 1 classe de diâmetro; 19-25 mm) foi utilizado para determinar a  $\rho_{agg}$ .

## **2.6 Determinação do carbono orgânico do solo (COS)**

O carbono orgânico do solo foi determinado usando o método de Walkley e Black, conforme EMBRAPA (2007). No final de cada teste da RT, foi utilizada uma subamostra de agregados de cada tratamento, classe de diâmetro e repetição, em metodologia encontrada em Tormena et al. (2008a) e em Guimarães et al. (2009). Um total de 60 amostras (3 tratamentos X 4 repetições X 1 Alíquota por repetição X 1 profundidade X 5 classes de diâmetro; 2-4; 4-8; 8-16; 16-19; e 19-25 mm) foi utilizada para determinar o COS.

## **2.7 Análise estatística**

A análise estatística foi testada como um delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas. Os valores originais das variáveis RT e COS foram submetidos às análises de variância e teste para comparação de médias, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos (Plantio Direto, Pastagem e Floresta Nativa) e quatro repetições (blocos de solo). As análises de variância atenderam às pressuposições básicas de distribuição log-normal dos resíduos, pelo teste Shapiro-Wilk ( $p > W > 0,05$ ), e de homocedasticidade das variâncias, pelo teste de Levene ( $p > 0,05$ ). Diferenças entre valores dos atributos do solo foram comparadas usando o teste Scott-Knott

( $p < 0.05$ ). Os testes estatísticos de médias foram realizados usando o programa Sisvar (FERREIRA, 2007). As análises estatísticas das pressuposições básicas e correlações entre os atributos físicos e mecânicos do solo foram realizadas por meio do programa estatístico SAS (SAS, 2001).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Momentos estatísticos

Os momentos estatísticos para RT e COS e os coeficientes dos testes de normalidade e homocedasticidade da variância são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Momentos estatísticos da resistência tênsil de agregados (RT) e do carbono orgânico do solo (COS) independentemente do sistema de manejo plantio direto, pastagem e floresta nativa e classes de diâmetro de agregados (2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm) utilizadas neste estudo.

| Indicador                 | Média  | CV (%) | Desv. Pad. | Mín   | Max    | F - Levene         | W - Shapiro-Wilk   |
|---------------------------|--------|--------|------------|-------|--------|--------------------|--------------------|
| RT (kPa)                  | 166,98 | 101    | 168        | 11,94 | 698,79 | 4,15*              | 0,77*              |
| log RT                    | 2,03   | 21     | 0,42       | 1,08  | 2,84   | 1,49 <sup>ns</sup> | 0,93 <sup>ns</sup> |
| COS (g dm <sup>-3</sup> ) | 18,98  | 38     | 7,20       | 6,08  | 36,48  | 1,95 <sup>ns</sup> | 0,98 <sup>ns</sup> |

\* indica valores de ( $P < 0,05$ ) para os testes de Levene e Shapiro-Wilk inferiores a 0,05 indicando falta de homogeneidade da variância e ou normalidade dos resíduos.

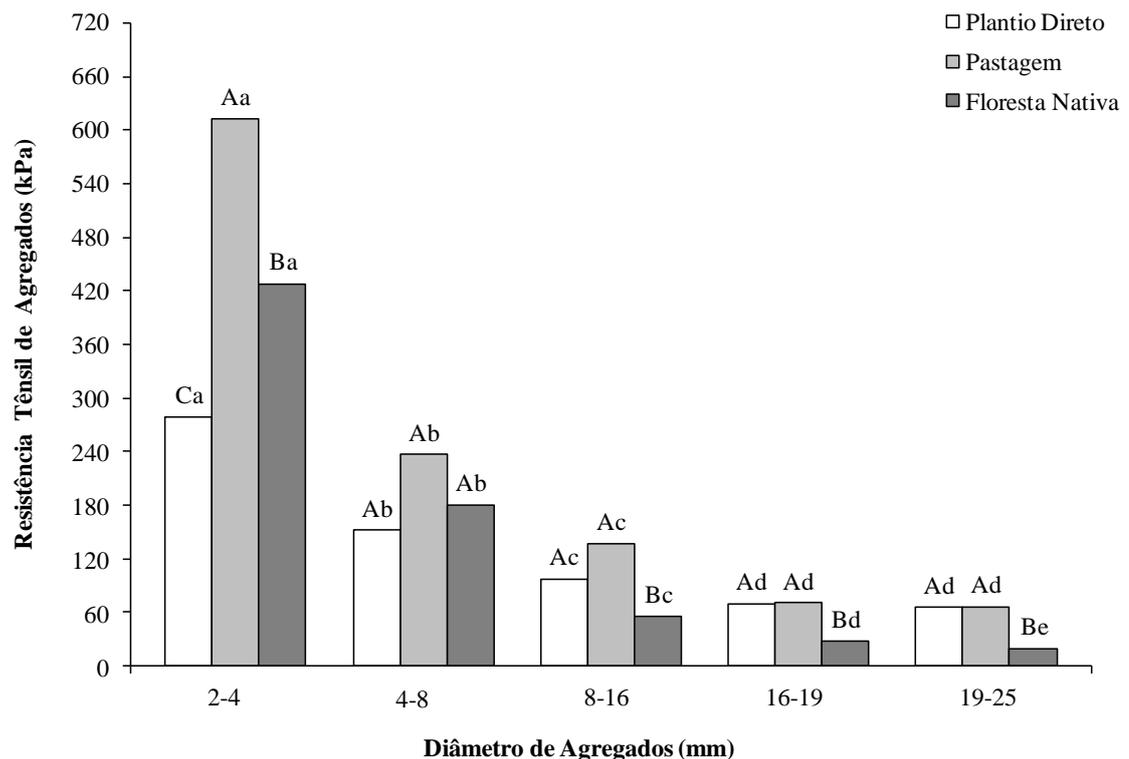
<sup>ns</sup> indica valores de ( $P > 0,05$ ) para os testes de Levene e Shapiro-Wilk superiores a 0,05 indicando que os dados apresentam homogeneidade da variância e distribuição normal dos resíduos.

Os resultados do teste de normalidade indicaram que a RT apresentou distribuição log-normal ( $p > W > 0,05$ ), independentemente dos sistemas de uso e manejo do solo. Esses resultados são semelhantes aos de Imhoff et al. (2002), Blanco-Canqui et al. (2005) e Tormena et al. (2008b). Entretanto, Dexter e Watts (2000) e Guimarães et al. (2009) verificaram distribuição normal para a RT. Em relação ao COS, foi constatada distribuição normal ( $p > W > 0,05$ ) nos tratamentos estudados. A dispersão dos dados da RT foi homogênea entre os tratamentos (Plantio Direto, Pastagem e Floresta Nativa), confirmada pelo teste de

homocedasticidade de Levene ( $p < 0,05$ ) (Vieira, 1999), como também foi verificado por Tormena et al. (2008a).

### 3.2 Resistência tênsil de agregados (RT)

Os resultados mostram um aumento gradativo nos valores de RT com a diminuição do diâmetro médio dos agregados, em cada sistema de uso e manejo do solo (Figura 1).



**Figura 1.** Valores médios de resistência tênsil para classes de diâmetro de agregados nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo dentro da mesma classe de diâmetro dos agregados. Letras minúsculas comparam diâmetro dos agregados do mesmo sistema de manejo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Os maiores valores de RT verificados com a redução da classe de diâmetro devem-se ao fato dos menores agregados possuírem menor quantidade de zonas de fraqueza. Isto é estabelecido pelo princípio de exclusão de poros amplamente reconhecidos na literatura, que implica na menor possibilidade de formação de fissuras e microfissuras nessas classes de diâmetro de agregados.

Blanco-Canqui et al. (2005) e Tormena et al. (2008) indicaram que solos sob floresta nativa possuem agregados menos resistentes à ruptura do que agregados de solos cultivados, devido a melhor estruturação do solo e alta concentração de COS.

Em relação aos sistemas de uso e manejo, os dados indicados na Figura 1 mostram que, para agregados com classe de diâmetro maior que 8 mm, a RT é maior nos tratamentos pastagem e plantio direto, comparada com o tratamento floresta nativa. Por outro lado, para agregados das classes de diâmetro menores que 8 mm, ocorreu uma inversão, com os maiores valores de RT no sistema pastagem e floresta nativa. O incremento considerável no tratamento pastagem provavelmente é devido à compactação do solo relacionada ao pisoteio de animais (DONKOR et al., 2001) e à redução na estabilidade estrutural devido à perda de COS (Figura 3), que promoveu a formação de agregados com maior densidade (Figura 2). Isto reduz os pontos de fraqueza entre unidades estruturais, causando aumento na resistência tênsil das classes de diâmetro dos agregados. De forma similar, Zhang (1994) verificou que a redução da resistência tênsil dos agregados do solo com o aumento do carbono orgânico decorreu do aumento da porosidade dos agregados. No presente estudo, este é o provável mecanismo envolvido no comportamento da resistência tênsil para agregados maiores que 8 mm.

No caso do incremento da RT no tratamento floresta nativa para agregados menores que 8 mm, pode estar associado ao aumento no número e força das ligações entre partículas, promovido pela matéria orgânica do solo, que proporciona maior estabilidade estrutural aos menores agregados. Por outro lado, o menor incremento da RT, verificado em agregados menores que 8 mm, no tratamento plantio direto, está relacionado, provavelmente, a uma reduzida mobilização na camada superficial do solo. Comportamento semelhante a este estudo também foi constatado por Blanco-Canqui et al. (2005).

### 3.3 Friabilidade do solo (F)

Os valores de F nos diferentes tratamentos são mostrados na Tabela 2. A ocorrência de menores valores de F indica que o solo pode ser fraturado em fragmentos de tamanho arbitrário (muito grandes e/ou muito pequenos), quando submetido a qualquer ação mecânica (semeadura), resultando em um meio físico inadequado para a germinação e crescimento das plântulas. Por outro lado, valores excessivamente elevados de F indicam a possibilidade de o solo sofrer intenso fraturamento, quando uma mínima força é aplicada, razão pela qual é imprópria sua utilização em culturas agrícolas mecanizadas (UTOMO e DEXTER, 1981; MACKS et al., 1996). Assim, neste trabalho, os tratamentos foram classificados como friável e/ou muito friável, evidenciando a existência de condições físicas adequadas para o bom contato solo-semente por ocasião da semeadura (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores de friabilidade <sup>(1)</sup> estimados para agregados com diâmetros entre 19-25 mm nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa.

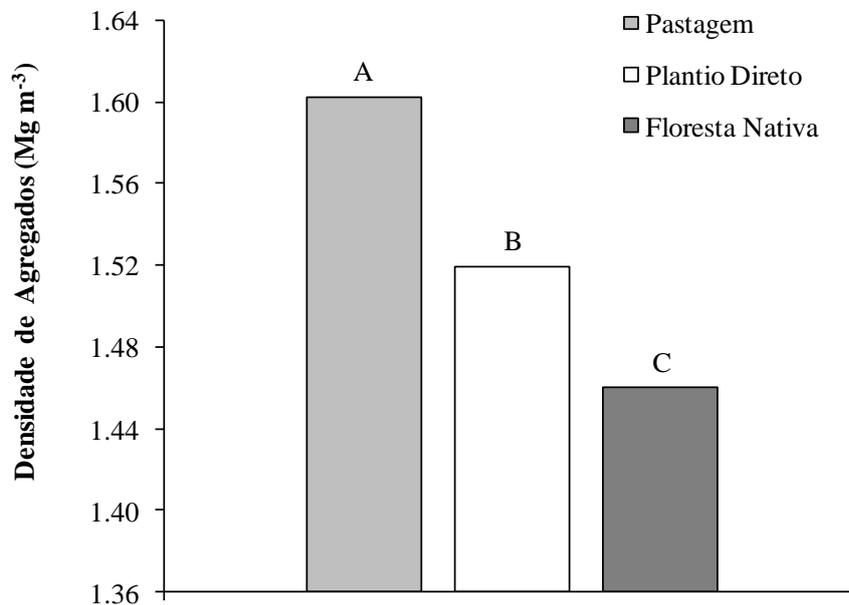
| Tratamento      | Média | Mínimo | Máximo | DP    | CV (%) |
|-----------------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Plantio Direto  | 0,43  | 0,39   | 0,48   | 0,089 | 20,65  |
| Pastagem        | 0,54  | 0,49   | 0,60   | 0,045 | 8,29   |
| Floresta Nativa | 0,44  | 0,40   | 0,49   | 0,081 | 18,20  |

<sup>(1)</sup> Friável ( $0,20 < F < 0,50$ ) e muito friável ( $0,50 < F < 0,80$ ).

Watts e Dexter (1998) citam que solos não cultivados (não preparados), tais como sistemas sob pastagem ou floresta nativa, são mais friáveis; caso contrário, ocorre em solos cultivados. Fatores do solo encontrados para aumentar a friabilidade incluem redução da concentração de argila dispersa, (SHANMUGANATHAN e OADES, 1982), diminuição do conteúdo de areia (PERFECT et al., 1995), bem como aumento da condutividade hidráulica, do teor de carbono orgânico, da estabilidade de agregados e diminuição da densidade (MACKS et al., 1996).

### 3.4 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )

Verificou-se aumento da  $\rho_{agg}$ , nos solos cultivados quando comparados ao solo sob floresta nativa (Figura 2). Os maiores valores de densidade dos agregados nos tratamentos pastagem e plantio direto podem ser decorrentes da compactação do solo pelo tráfego de máquinas e ou pisoteio animal. A compactação nos solos, sob pastagem e sistema plantio direto, pode ter provocado a coalescência dos agregados, aumentando as suas densidades individuais pela redução do espaço poroso intra-agregado. Estes valores são similares aos valores obtidos por Blanco-Canqui et al. (2005).



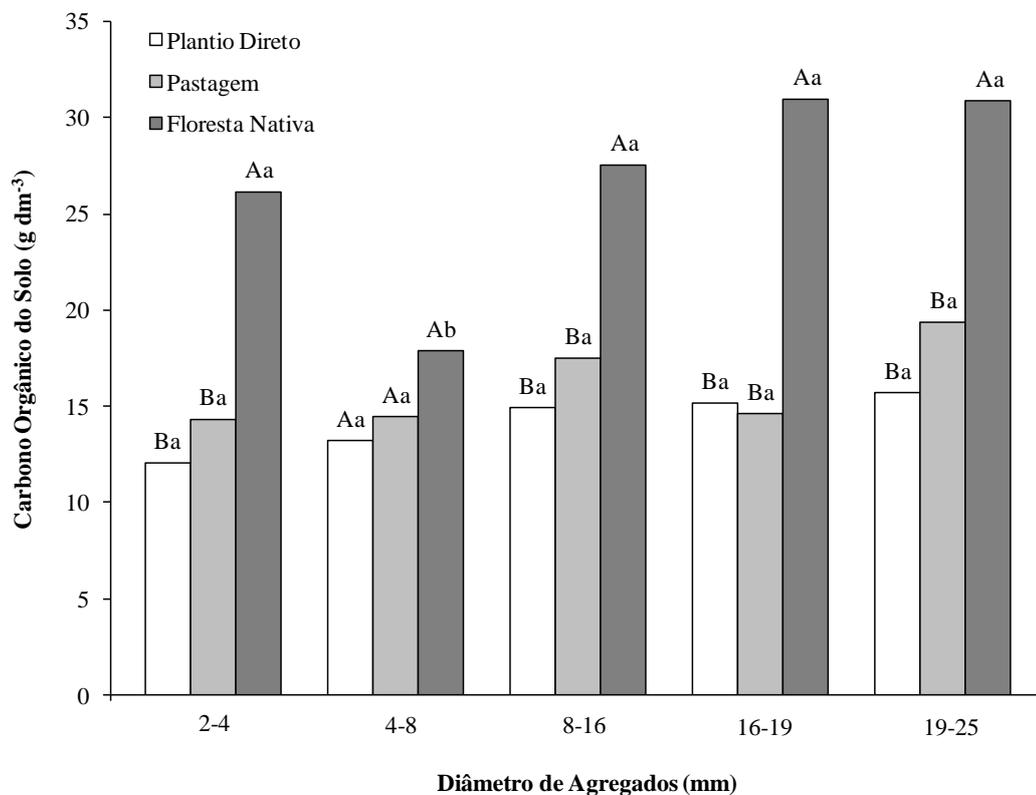
**Figura 2.** Valores médios de densidade de agregados nos tratamentos pastagem, plantio direto e floresta nativa. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Quando determinada a  $\rho_{agg}$  pelo método sugerido por Almeida et al. (2009), verificou-se maiores valores em comparação aos observados por Blanco-Canqui et al. (2005) em solos cultivados e floresta nativa, que provavelmente está associado às diferentes constituições orgânica e mineral dos solos. Outro aspecto é em relação à metodologia utilizada por Blanco-Canqui et al. (2005), para a determinação da densidade dos agregados. Os maiores valores da  $\rho_{agg}$  observados neste estudo podem estar relacionados ao fato de terem sido

necessárias duas imersões para a impermeabilização completa dos agregados, visto que uma imersão não foi suficiente. Contudo, estes valores estão abaixo daqueles observados por Almeida et al. (2009) num Latossolo brasileiro.

### 3.5 Carbono orgânico do solo (COS)

Verificou-se a redução do COS nos solos cultivados (Figura 3). Os resultados observados neste estudo estão de acordo com Six et al. (2000), Blanco et al. (2005) e Tormena et al. (2008a), que verificaram maiores valores de COS em solo sob floresta nativa, em comparação com solos cultivados.



**Figura 3.** Valores médios do carbono orgânico do solo nos tratamentos plantio direto, pastagem e floresta nativa. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo dentro de cada classe de diâmetro dos agregados e letras minúsculas comparam classes de diâmetro dos agregados do mesmo sistema de manejo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

De forma similar ao que obtivemos neste estudo, Aratani et al. (2009) constataram melhor qualidade física do solo sob floresta nativa quando comparada com áreas submetidas à ação antrópica. Os autores citam que a

substituição da floresta nativa por culturas anuais causa a redução do conteúdo de matéria orgânica em função do revolvimento do solo, favorecendo a oxidação da matéria orgânica que está diretamente relacionada aos teores de COS.

### 3.6 Inter-relações entre a resistência tênsil de agregados (RT) e o carbono orgânico do solo (COS) nas diferentes classes de diâmetro de agregados do solo.

A RT apresentou correlação significativa com os teores de COS ( $p < 0,05$ ), para as classes de agregados 8-16 mm, 16-19 mm e 19-25 mm (Tabela 3). Nessas classes de diâmetro dos agregados, o COS e RT correlacionaram-se negativamente, indicando que o incremento da RT implica na diminuição dos teores de COS no solo e vice-versa. Tal comportamento também foi observado por Blanco-Canqui et al. (2005) através da correlação geral entre RT e COS. Por outro lado, estes resultados diferem dos obtidos por Imhoff et al. (2002), provavelmente, por utilizarem solos com faixa menos ampla de teor de COS.

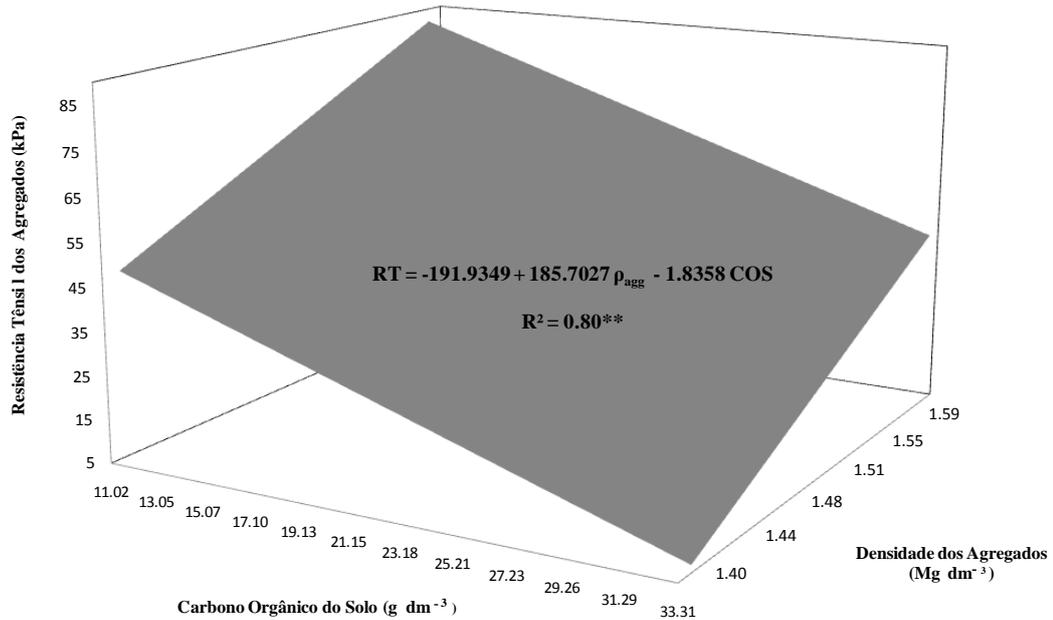
**Tabela 3.** Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a resistência tênsil de agregados (RT) e o carbono orgânico do solo (COS) para diferentes classes de diâmetro de agregados.

|                         |   | COS    |        |         |         |         |
|-------------------------|---|--------|--------|---------|---------|---------|
| Classe de Diâmetro (mm) |   | 2-4    | 4-8    | 8-16    | 16-19   | 19-25   |
| RT                      | R | 0.15   | 0.08   | - 0.66* | - 0.73* | - 0.76* |
|                         | P | > 0.63 | > 0.81 | < 0.05  | < 0.01  | < 0.01  |

\*Indica valores de correlação negativa entre atributos.

### 3.7 Superfície de resposta da relação do carbono orgânico do solo (COS) e a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) sobre a resistência tênsil de agregados da classe de diâmetro 19 - 25 mm

As relações entre resistência tênsil, densidade e teor de carbono orgânico de agregados do solo, da classe de diâmetro 19-25 mm, nos sistemas de uso e manejo estudados, estão apresentadas na (Figura 4).



**Figura 4.** Influência do carbono orgânico do solo e a densidade de agregados sobre a resistência tênsil de agregados da classe de diâmetro 19-25 mm.

Verifica-se que o aumento do teor de COS resultou no decréscimo no valor da RT. Em contrapartida, quando se elevou a  $\rho_{agg}$ , ocorreu o aumento da RT. Foi verificada relação entre estas variáveis, indicando que processos que regem as variações de RT relacionados ao tamanho de agregados são dependentes dos teores de carbono orgânico do solo. Este comportamento do COS sobre a RT foi também constatado por Blanco-Canqui et al. (2005), Tormena et al. (2008b) e Ferreira et al. (2011), que se relaciona, provavelmente, com o efeito da matéria orgânica. Zhang (1994), citado por Tormena et al. (2008a), indica que há dois efeitos contrários da matéria orgânica do solo sobre a resistência tênsil dos agregados: o aumento no número e na força das ligações entre as partículas; e o efeito de diluição, que implica redução da densidade do

solo ou aumento da porosidade do agregado à medida que seu tamanho aumenta. Além da quantidade de matéria orgânica do solo, ressalta-se que o grau de humificação influencia a resistência tênsil dos agregados, conforme reportado por Zhang (1994), demonstrando que, quanto mais humificada a matéria orgânica do solo, menor será o seu efeito em reduzir a resistência tênsil de agregados.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que:

1. Com a redução do diâmetro de agregados do solo, ocorreu um acréscimo nos valores de RT;
2. Os maiores valores de RT no tratamento pastagem estão de acordo com a maior densidade de agregados verificada no sistema de uso e manejo do solo;
3. Independentemente dos sistemas de manejo, o solo foi classificado como friável e muito friável; e
4. Independentemente dos maiores valores de RT e  $\rho_{agg}$  e menores teores de COS observados nos solos cultivados, não foi constatado o comprometimento da qualidade física e estrutural do solo sob os distintos sistemas de uso e manejo.

### III - CAPÍTULO 2 – INFLUÊNCIA DE POSIÇÕES DE AMOSTRAGEM NA RESISTÊNCIA TÊNซิล, DENSIDADE E CARBONO ORGÂNICO DE AGREGADOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB LONGO TEMPO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

#### RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes posições de amostragem sobre alguns atributos físicos e mecânicos de agregados do solo num Latossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto (SPD) implantado por longo tempo. A amostragem de solo foi conduzida em agosto 2010, numa área agrícola comercial localizada no município de Maringá, Estado do Paraná, numa área sob SPD, implantado a cerca de 30 anos. A amostragem de solo consistiu em abertura aleatória de 10 mini-trincheiras nas quais foram coletados blocos de solo de dimensões 10 x 10 x 10 cm, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, nas posições de amostragem linha, entrelinha e ponto intermediário entre linha e entrelinha, perpendicular às linhas da cultura do milho (*Zea mays* L.). No laboratório, foram obtidos agregados com diâmetros entre 12,5 -19,0 mm. Nesta classe de diâmetro dos agregados, determinou-se a resistência tênซิล (RT) de 2400 agregados e, a partir desta, foi estimada a friabilidade do solo (F). Determinou-se também a densidade dos agregados ( $\rho_{agg}$ ) para 600 agregados da classe de diâmetro 12,5-19,0 mm. Foram feitas determinações do teor de carbono orgânico do solo (COS) para avaliar a sua relação com a RT. Os resultados mostraram que na camada de 0-10 cm, houve maiores valores de F no tratamento linha e não houve diferenças de RT entre as posições de amostragem. Entre as camadas, os valores de RT são maiores na entrelinha e ponto intermediário na camada de 0-10 cm. Não foram verificados efeitos significativos da posição de amostragem na densidade dos agregados e friabilidade do solo, mas, independente da posição amostrada, o solo recebeu a classificação friável. O COS não se diferenciou entre as posições de amostragem, distinguindo-se apenas entre as camadas amostradas.

**Palavras-chaves:** resistência tênซิล, densidade dos agregados, friabilidade do solo, carbono orgânico do solo, plantio direto.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the influence of different sampling positions on some physical and mechanical soil aggregates in a Oxisol under no-tillage (NT). Soil sampling was conducted in August 2010 in a commercial farming area in the municipality of Maringá, Paraná of State. The soil sampling consisted of randomly opening of 10 mini-trenches which were collected in soil blocks of dimensions 10 x 10 x 10 cm, at 0-10 and 10-20 cm depth, the sampling positions perpendicular to lines of maize (*Zea mays* L.) row (L), interrow (EL) and an intermediate position (IP) between L and EL under no-tillage (NT). At each sampling position, it was determined tensile strength (TS) and friability (F) 40 aggregate classes 12.5-19 mm in diameter and density of aggregates ( $\rho_{agg}$ ) 10 to aggregate on each repetition. Also determinations were made of the organic carbon content of the soil (SOC) to assess its relationship with the tensile strength. The results showed that in the 0-10 cm layer is found higher values of F for the line sampling position and there were no differences between the RT of sampling positions. However, at the EL region the RT values are greater at 0-10 cm layer. There were no significant effects of sampling position in the density of aggregates and soil friability, but independently of the sampling position the soil was classified friable. The COS did not differ between the sampling positions, distinguishing only between the layers sampled.

**Keywords:** tensile strength, density aggregates, friability.

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Plantio Direto (SPD) é apontado como um dos maiores avanços tecnológicos que ocorreu na agricultura moderna. A sua adoção incorpora uma série de novos valores básicos, pautados em um sistema de produção sustentável, em contraponto ao sistema convencional de preparo do solo. Conceitualmente, o SPD é um sistema conservacionista de manejo caracterizado pela manutenção da palhada remanescente do cultivo, reduzida mobilização do solo, utilização de rotação de culturas, reduzida taxa de mineralização da matéria orgânica, maior atividade biológica no solo e pela

intensificação dos processos de agregação do solo. Comparado com sistemas de mobilização intensa do solo, o SPD proporciona menores riscos de erosão hídrica, redução no consumo de combustível fóssil, menores custos de produção e menor poluição de recursos hídricos.

Norteados pelos princípios de reduzida mobilização do solo, da manutenção permanente da palhada e cobertura do solo, e da manutenção de um sistema de diversificação ou rotação de culturas, o SPD assistiu a um aumento expressivo no seu número de adeptos. A adoção generalizada do SPD ocorreu devido ao efetivo controle da erosão e redução nos custos de produção associado com o menor gasto de combustível com operações mecanizadas. Atualmente, o SPD abrange mais de 5 milhões de hectares no Paraná e cerca de 26 milhões de hectares no Brasil (FEBRAPDP, 2008). Em nível mundial, as estimativas são de cerca de 105 milhões de hectares (DERPSCH e FRIEDRICH, 2009).

Dentre os princípios do SPD, a rotação de culturas tende a ser o mais negligenciado, que reflete principalmente na inadequada cobertura do solo. Desta forma, solos com pouca cobertura e conduzidos em sistema de sucessão, especialmente pertencentes à classe textural argilosa ou muito argilosa, estão predispostos à formação de camadas superficiais compactadas. A reduzida mobilização do solo e a possibilidade de tráfego sob condições de elevada umidade são particularidades do SPD que, associadas ao aumento da massa dos maquinários, também têm contribuído para uma maior compactação superficial do solo (TORMENA et al., 1998), situação apontada como uma das cinco principais restrições para a expansão do SPD (SIQUEIRA, 2008). Isto exige que as semeadoras-adubadoras para SPD sejam equipadas com mecanismos eficientes para o corte do solo compactado e dos restos culturais uma vez que a reduzida mobilização do solo é restrita à linha de semeadura, onde serão abertos os sulcos para deposição dos fertilizantes e sementes nas profundidades e distâncias adequadas.

Para romper a compactação superficial, em algumas regiões, o uso de sulcadores do tipo haste nas semeadoras de SPD tem se generalizado como a melhor estratégia (SIQUEIRA, 2008). Siqueira e Casão Jr (2004) mostraram que

o uso de hastes com formato parabólico, ângulo de ataque em torno de 20 graus e espessura máxima da ponteira de 22 mm reduzem em cerca de 50 % a potência requerida de tração de uma semeadora-adubadora de plantio direto com nove linhas. Além disso, mobilizam uma menor área de solo e, conseqüentemente, mantendo o solo mais protegido, além de diminuir consideravelmente o custo com combustível por área. Reis et al. (2004) verificaram que o sistema de abertura de sulcos por hastes proporcionou maior porcentagem de emergência de plantas em relação ao sistema de discos duplos, indicando melhoria da qualidade física do solo na linha de semeadura. Modolo et al. (2004) demonstraram que o sistema de hastes proporcionou menor variação na profundidade média de deposição das sementes do que os discos duplos.

Apesar destas constatações, a maioria dos estudos sobre a qualidade física do solo em SPD não leva em conta a variação espacial sistemática dos atributos físicos do solo (CASSEL e NELSON, 1985), que é determinada pelo tráfego de máquinas nas entrelinhas e pela mobilização do solo durante a semeadura (ONOFIOK, 1988). Além desses, deve-se levar em conta a ação física, química e biológica do sistema radicular das culturas sobre a estrutura do solo. Alguns autores indicam a importância da posição de amostragem: Kaspar et al. (1991) concluíram que a camada de 0-15 cm da entrelinha trafegada apresentava 50 % menos raízes de milho, comparada à entrelinha sem tráfego; Mohanty et al. (1996) verificaram que a taxa de infiltração de água foi máxima na posição relativa à linha da cultura; Correchel et al. (1999) concluíram que a densidade do solo foi maior na entrelinha comparada a posição relativa à linha da cultura do milho; e Starr e Timlin (2004) avaliaram a dinâmica da água na linha e entrelinha da cultura do milho e encontraram que a maior absorção pelas plantas ocorreu na linha.

O estudo de agregados pode indicar o efeito das hastes dos implementos bem como os efeitos químicos e físicos da atividade de raízes na linha da cultura em comparação com a região da entrelinha. Desta forma, quantitativamente, a RT pode ser um indicador da organização da estrutura do solo, uma vez que é definida como a força por unidade de área necessária para causar a ruptura dos

agregados (DEXTER e WATTS, 2000). A heterogeneidade da RT resultante dos planos de fraqueza ou zonas de falhas dentro dos agregados é identificada como friabilidade (DEXTER e WATTS, 2000) e é considerada uma propriedade importante do ponto de vista da qualidade da cama de semeadura. Também, a  $\rho_{agg}$  está relacionada com vários parâmetros da estrutura do solo, razão pela qual esse atributo físico tem sido usado em diversos estudos sobre a qualidade física e estrutural dos solos. Em relação ao COS, tanto a forma como a estabilidade da estrutura do solo estão relacionadas com os seus teores no solo.

A única operação de mobilização do solo no SPD é caracterizada pela abertura do sulco durante a operação de semeadura. Nesta ocasião, o mecanismo de abertura do sulco propicia um reduzido preparo vertical e horizontal na linha de semeadura, modificando fisicamente o solo na camada acima do limite de profundidade da sua atuação, onde ocorrerá a deposição do fertilizante e das sementes. Neste estudo, estabeleceu-se a hipótese de que a estrutura do solo é modificada pelas posições de amostragem e que a mesma pode ser identificada através do estudo de atributos físicos e mecânicos dos agregados individuais do solo, sendo estes atributos indicadores da qualidade física do solo. Assim, o objetivo foi avaliar o efeito de diferentes posições de amostragem sobre alguns atributos físicos e mecânicos de agregados do solo num Latossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Área experimental e descrição de manejo do solo**

Este trabalho foi realizado numa área agrícola comercial, localizada no município de Maringá, Estado do Paraná (23°30'31" S e 51°59'49" W), apresentando relevo plano (declividade média de 3 %), com altitude 445, 62 m. A Figura 1 indica a área experimental amostrada.



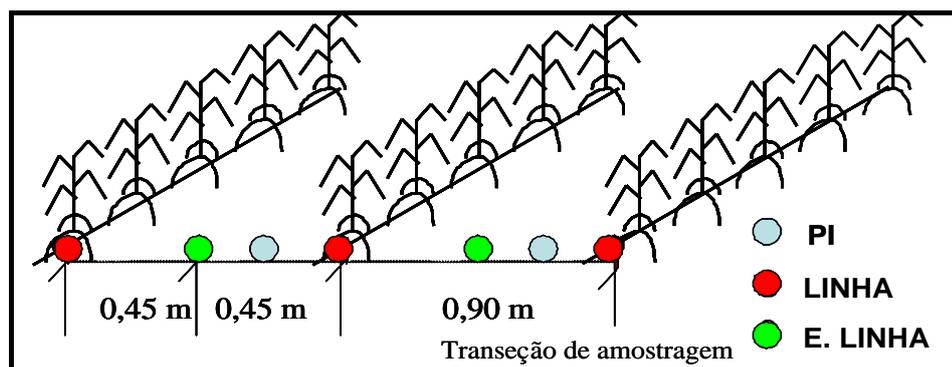
**Figura 1.** Vista panorâmica da área agrícola comercial amostrada. Fonte: Google Earth, 2011.

Segundo a classificação de Köppen (EMBRAPA, 1984), nesta região, o tipo climático dominante é caracterizado como Cfa (subtropical úmido mesotérmico), com médias anuais de temperatura e precipitação de 22 °C e 1450 mm, respectivamente. O solo foi identificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), (EMBRAPA, 2006). A análise granulométrica, realizada em amostras retiradas na camada de 0-20 cm, indicou valores de 132 g kg<sup>-1</sup> de areia grossa, 105 g kg<sup>-1</sup> de areia fina, 96 g kg<sup>-1</sup> de silte e 667 g kg<sup>-1</sup> de argila, enquadrando-se na classe textural muito argilosa (EMBRAPA, 2006).

A área experimental selecionada para este estudo é conduzida em SPD desde 1979 e iniciou com um sistema de rotação de culturas envolvendo as culturas de soja/trigo/milho/aveia. Ao longo de mais de 30 anos de SPD, foram feitas correções de solos com a aplicação de calcário dolomítico ou calcítico, em doses variáveis, conforme resultados das análises de solos. As aplicações de corretivos sempre foram feitas a lanco e em superfície, sem qualquer incorporação mecânica. Atualmente, o sistema de rotação envolve as culturas de milho/aveia/soja/milho safrinha/soja/trigo. A cultura de aveia é semeada em linhas, utilizando a mesma semeadora disponível para a cultura de trigo.

## 2.2 Amostragem e preparação de agregados de solo

A amostragem de solo foi conduzida em agosto de 2010, e consistiu em abertura aleatória de 10 mini-trincheiras, nas quais foram coletadas perpendicularmente às linhas de plantio da cultura do milho (*Zea mays* L.) (L), entrelinha (E. Linha) e ponto intermediário (PI) entre as linhas e entrelinhas como é apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Esquema de coleta das amostras com estrutura indeformada em um Latossolo Vermelho distroférico ao longo de um traçado perpendicular às linhas de cultivo, nas posições Linha, Ponto Intermediário (PI) e Entrelinha (E. Linha).

Foram amostrados 60 (3 tratamentos X 2 profundidades X 10 repetições) blocos de solo com dimensões de 10 x 20 x 10 cm nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade. Os blocos de solo foram acondicionados em sacos plásticos, identificados e transportados para o laboratório. No laboratório, os blocos de solo (amostras) foram fragmentados manualmente em seus agregados naturais. No processo de quebra manual, foi aplicada somente a força mínima necessária para fraturar os agregados em seus pontos de fraqueza pré-existentes, sendo classificados através de peneiras com abertura de malha 12,5 e 19,0 mm. Em seguida, os agregados foram secos ao ar, por 36 horas, conforme (BLANCO-CANQUI et al., 2005), para secagem final e homogeneização do teor de água dos mesmos. Após a secagem, os agregados foram acondicionados em caixas plásticas para armazenamento até a determinação da resistência tênsil e densidade de agregados.

### 2.3 Determinação da resistência tênsil de agregados (RT)

A resistência tênsil de agregados individual foi determinada usando o método (DEXTER e KROESBERGEN 1985; DEXTER e WATTS, 2000). Um total de 2400 agregados (3 tratamentos X 10 repetições X 40 agregados por repetição X 2 profundidades X 1 classe de diâmetro: 12,5-19,0 mm) foi utilizado para o teste de RT, conforme metodologia descrita em Tormena et, al. (2008a, 2008b). Cada agregado foi pesado em balança analítica e, em seguida, submetido, individualmente, a um teste de tensão indireta, a uma velocidade constante de  $1,55 \text{ mm s}^{-1}$ , e com controle automatizado, sendo utilizado um dinamômetro digital eletrônico de precisão, composto por célula de carga com carga nominal de 20 kgf. O aparelho utilizado para este estudo é descrito por FIGUEIREDO et al. (2011). As medidas foram determinadas em agregados colocados na posição mais estável, sendo visível a formação de uma fissura contínua ao longo do diâmetro polar do agregado, após a aplicação da carga compressiva.

A RT foi calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 (P/D^2) \quad (1)$$

Onde RT é a resistência tênsil, usualmente representada em kPa; 0,576, o coeficiente de proporcionalidade que reflete a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P, a força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); e D, o diâmetro efetivo (m).

O diâmetro efetivo(D) foi calculado conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$D = D_m (M/M_0)^{1/3} \quad (2)$$

Onde  $D_m$  é o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média do tamanho das peneiras utilizadas para selecionar os agregados; M é a massa do agregado individual (g);  $M_0$ , a massa média dos agregados em cada tratamento (g). No final de cada teste da RT, uma subamostra dos agregados de cada amostra foi utilizada para determinação da umidade residual do solo.

## 2.4 Estimativa da friabilidade do solo (F)

A friabilidade foi estimada através de agregados da classe de diâmetro 12,5-19,0 mm, pelo método do coeficiente de variação proposto por Watts e Dexter (1998). Neste método, os valores F são obtidos através do coeficiente de variação dos valores medidos de RT em cada tratamento:

$$F = \frac{\sigma Y}{Y} \pm \frac{\sigma Y}{Y \sqrt{2n}} \quad (3)$$

Sendo F a friabilidade do solo;  $\sigma Y$ , o desvio-padrão dos valores medidos da RT;  $Y$ , a média dos valores medidos de RT; e  $n$ , o número de repetições. O segundo termo é o erro-padrão do coeficiente de variação.

As classes de friabilidade, utilizadas neste trabalho, foram tomadas com base nos valores de F (adimensional) propostos por Imhoff et al. (2002): não friável (< 0,01), ligeiramente friável (0,10–0,20), friável (0,20–0,50), muito friável (0,50–0,80) e mecanicamente instável (> 0,80).

## 2.5 Determinação da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )

A densidade individual de agregados foi medida usando o método do torrão impermeabilizado, segundo Grossman e Reinsch (2002). Um total de 600 agregados (10 agregados X 10 repetições X 2 profundidades X 3 tratamentos) foi utilizado para medir a  $\rho_{agg}$ . Os agregados foram amarrados com linha de costura, pesados e cobertos com parafina na temperatura de 60 °C. O revestimento utilizado para a impermeabilização dos agregados foi parafina industrial com uma densidade de 0,9 g cm<sup>-3</sup>. Após cobertos com parafina, os agregados foram pesados antes de fazer a sua imersão em água destilada a 25°C. Após a imersão, os agregados são novamente pesados para determinar sua perda de massa, sendo que a perda de massa é igual ao volume dos agregados. Este procedimento foi feito conforme Grossman e Reinsch (2002). Para o cálculo do volume dos agregados, foi realizada a correção para o volume de parafina que aderiu à superfície dos agregados.

## **2.6 Determinação do carbono orgânico do solo (COS)**

O carbono orgânico do solo foi determinado usando o método de Walkley e Black, conforme EMBRAPA (2007). No final de cada teste da RT, uma subamostra de agregados de cada tratamento, classe de diâmetro e repetição, resultando num total de 60 amostras (3 tratamentos X 10 repetições X 1 Alíquota por repetição X 2 profundidade X 1 classe de diâmetro; 12,5 – 19,0 mm) foi utilizada para determinar o COS.

## **2.7 Análise estatística**

Os valores originais das variáveis RT, F, COS e  $\rho_{ag}$  foram submetidos às análises de variância e teste para comparação de médias, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos (Linha, Ponto Intermediário e Entrelinha), duas profundidades e dez repetições. As análises de variância atenderam às pressuposições básicas de distribuição normal dos resíduos, pelo teste Shapiro-Wilk ( $p > W > 0,05$ ), e de homocedasticidade das variâncias, pelo teste de Levene ( $p > 0,05$ ). Diferenças entre valores das variáveis foram comparadas usando o teste Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Estes testes estatísticos de médias foram realizados usando o programa Sisvar (FERREIRA, 2007). As análises estatísticas das pressuposições básicas e de correlações entre atributos físicos e mecânicos do solo foram realizadas por meio do programa estatístico SAS (SAS, 2001).

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1 Momentos Estatísticos**

Os momentos estatísticos dos atributos físicos e mecânicos do solo estudados são apresentados na Tabela 1. Os resultados do teste de normalidade indicaram que a RT apresentou distribuição normal ( $p > W > 0,05$ ), independentemente das posições de amostragem do solo. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Dexter e Watts (2000) e Guimarães et al. (2009), os quais verificaram distribuição normal para a RT. Em relação à F,  $\rho_{agg}$  e COS, foi constatada distribuição normal ( $p > W > 0,05$ ) nos tratamentos estudados.

No caso da F, foram encontrados valores discrepantes (outlier), os quais foram retirados da planilha de análises para atender às pressuposições básicas de distribuição normal dos resíduos, pelo teste de Shapiro-Wilk ( $p > W > 0,05$ ), e homocedasticidade das variâncias, pelo teste de Levene ( $p > 0,05$ ).

**Tabela 1.** Momentos estatísticos e coeficientes dos testes de normalidade e homocedasticidade da resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade do solo (F), densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e carbono orgânico do solo (COS) independentemente da posição de amostragem linha, ponto intermediário e entrelinha.

| Indicador                          | Média | CV (%) | Desv. Pad. | Mín   | Max    | F - Levene         | W – Shapiro-Wilk   |
|------------------------------------|-------|--------|------------|-------|--------|--------------------|--------------------|
| RT (kPa)                           | 88,31 | 22,28  | 19,67      | 46,29 | 151,21 | 1,12 <sup>ns</sup> | 0,99 <sup>ns</sup> |
| F                                  | 0,38  | 17,37  | 0,07       | 0,27  | 0,66   | 1,30 <sup>ns</sup> | 0,92*              |
| F (Outlier)                        | 0,37  | 13,69  | 0,05       | 0,27  | 0,50   | 1,46 <sup>ns</sup> | 0,96 <sup>ns</sup> |
| $\rho_{agg}$ (Mg m <sup>-3</sup> ) | 1,42  | 3,43   | 0,05       | 1,29  | 1,51   | 1,08 <sup>ns</sup> | 0,97 <sup>ns</sup> |
| COS(g dm <sup>-3</sup> )           | 15,57 | 28,41  | 4,42       | 7,82  | 23,47  | 0,37 <sup>ns</sup> | 0,98 <sup>ns</sup> |

\* indica valores de ( $P < 0,05$ ) para os testes de Levene e Shapiro-Wilk inferiores a 0,05 indicando falta de homogeneidade da variância e ou normalidade dos resíduos.

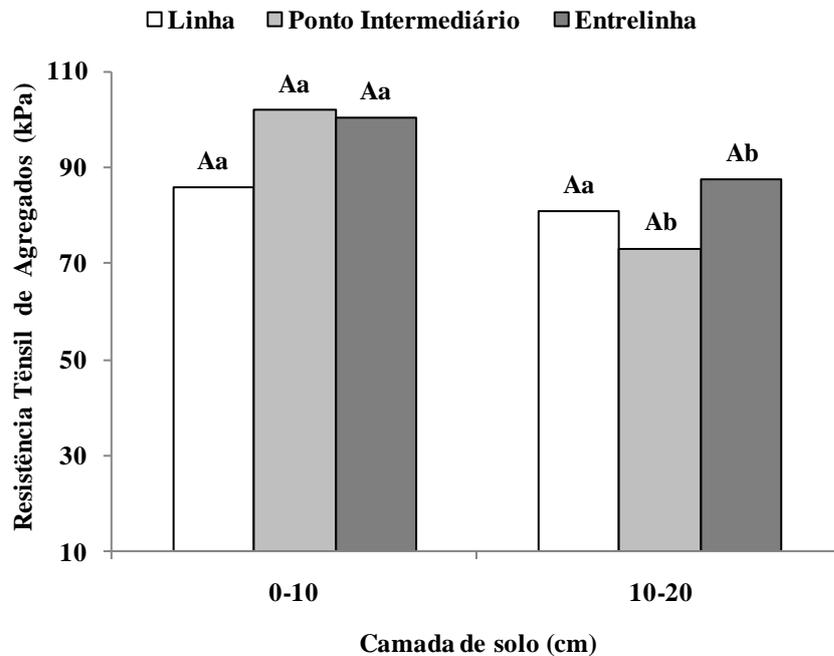
<sup>ns</sup> indica valores de ( $P > 0,05$ ) para os testes de Levene e Shapiro-Wilk superiores a 0,05 indicando que os dados apresentam homogeneidade da variância e distribuição normal dos resíduos.

F (Outlier) Indica análise com valor discrepante.

### 3.2 Resistência tênsil de agregados (RT)

Os resultados mostraram que a RT não apresentou diferenças significativas entre posições de amostragem ( $P < 0,05$ ) nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm (Figura 3). Este comportamento pode estar relacionado, provavelmente, ao fato de não haver diferenças na densidade e COS nesta camada, como mostrado nos resultados apresentados nas Figuras 5 e 6. Estas constatações sugerem que, do ponto de vista da RT, não há distinção entre as posições de amostragem, apesar da influência marcante do mecanismo de

abertura de sulco sobre as propriedades físicas do solo, como atestam Reis et al. (2004), bem como do sistema radicular da cultura. Neste sentido, sugere-se que as eventuais diferenças na qualidade da cama de semeadura entre as posições de amostragem são mais dependentes da distribuição dos tamanhos de agregados, do que propriamente da RT.



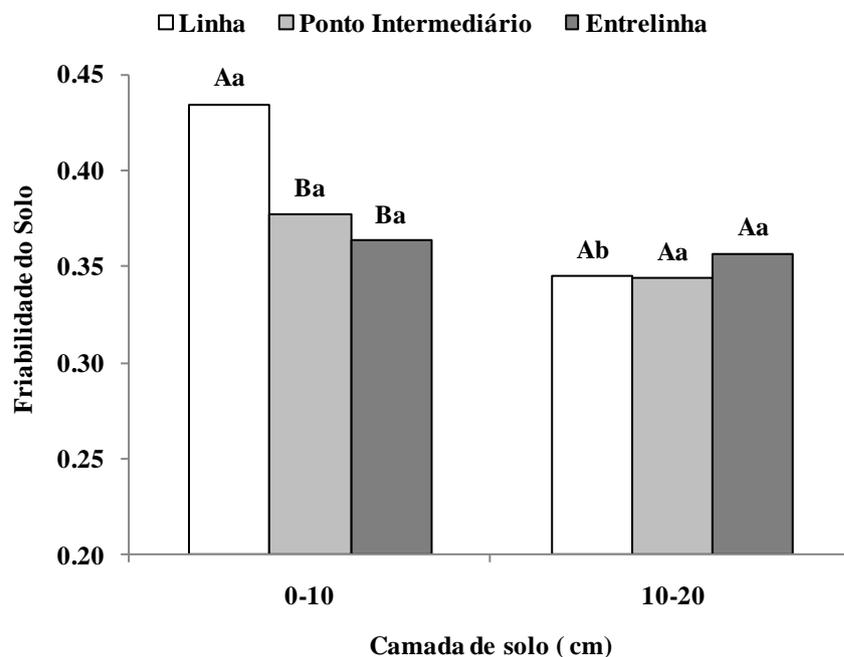
**Figura 3.** Valores médios de resistência tênsil de agregados nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha. Letras maiúsculas comparam as médias entre as posições de amostragem dentro da camada e letras minúsculas entre camadas dentro de cada posição de amostragem. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Na comparação entre as camadas do solo, os resultados mostraram que valores de RT são maiores na camada de 0-10 cm nas posições ponto intermediário e entrelinha em comparação com a linha. Estes resultados sugerem que a posição linha é um ambiente físico homogêneo na camada de 0-20 cm em comparação com a entrelinha e ponto intermediário. Fora da linha, os maiores valores de RT na camada de 0-10 cm sugerem que os efeitos do tráfego de máquinas e aqueles devidos ao mais intenso secamento e umedecimento do solo resultam num aumento da RT em comparação com a camada de 10-20 cm. Além disso, os menores valores de RT na linha da cultura indicam que o mecanismo de

abertura do sulco para a semeadura da cultura do milho foi efetivo em alterar a estrutura do solo na camada estudada. Os valores de RT na região da entrelinha são mais elevados que os da linha, numericamente. Entretanto, não há diferença estatística, isto pode ser um fator que contribui para o maior crescimento de raízes, ampliando o volume de solo explorado pelas plantas.

### 3.3 Friabilidade do solo (F)

Os valores médios de F nas diferentes posições de amostragem são mostrados na Figura 4.



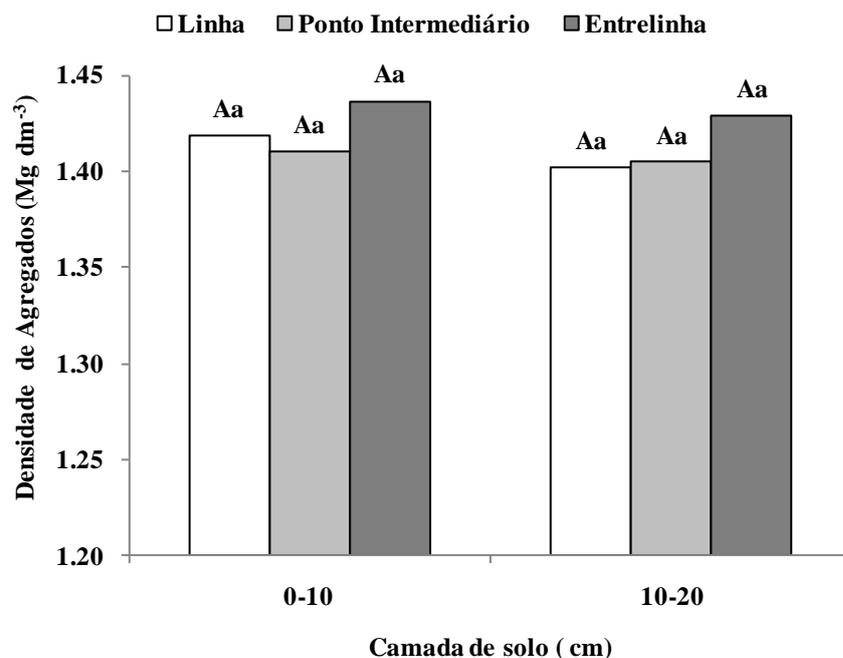
**Figura 4.** Valores médios de friabilidade do solo nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha. Letras maiúsculas comparam as médias entre as posições de amostragem dentro da camada e letras minúsculas entre camadas dentro de cada posição de amostragem. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Na camada de 0-10 cm, os resultados indicam que valores de F no tratamento linha são maiores em comparação com valores da entrelinha e ponto intermediário ( $P < 0.05$ ). Este comportamento pode estar relacionado à ação do mecanismo de abertura do sulco para a semeadura, pelas raízes da cultura do milho, que se distribuem formando boa agregação e incrementado a porosidade dos agregados. Já na camada de 10-20 cm de profundidade, não foi observada

diferença significativa entre médias das posições de amostragem, isto ocorreu, provavelmente, porque não houve ação do mecanismo de abertura de sulco para a semeadura. Provavelmente, a atividade do sistema radicular das culturas não teve impacto suficiente para alterar a porosidade interna dos agregados e influenciar a friabilidade do solo. Estes resultados estão em acordo com os RT, que mostraram maiores valores de RT para a região da entrelinha, comparada à posição linha da camada de 0-10 cm. Independentemente da posição amostrada, o solo é classificado como friável.

### 3.4 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )

Não foram verificadas diferenças significativas ( $p>0,05$ ) na  $\rho_{agg}$  entre as posições de amostragem e camadas de solo avaliadas (Figura 5).



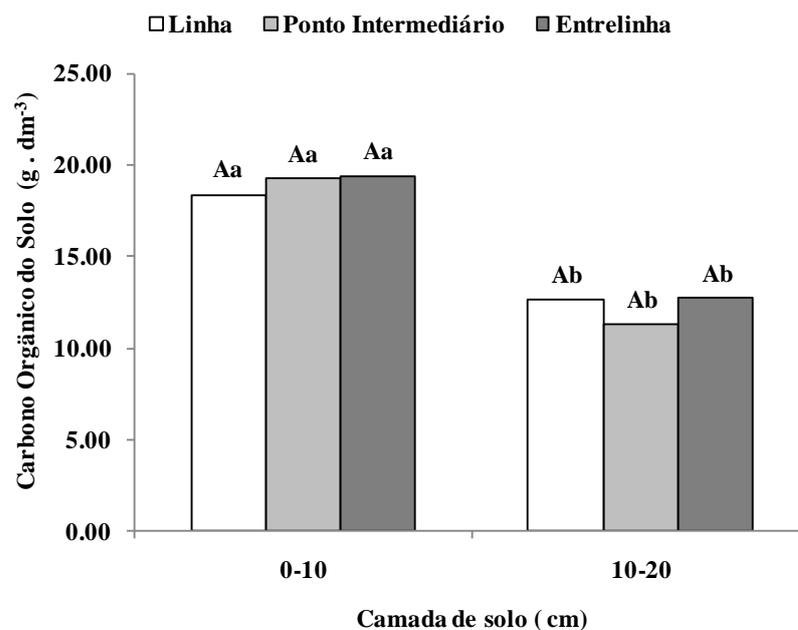
**Figura 5.** Valores médios de densidade de agregados nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha. Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos dentro da camada e letras minúsculas entre camadas dentro de cada posição de amostragem. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

A densidade do agregado pode ser considerada uma medida do comportamento da estrutura do solo numa escala muito maior do que aquela medida pela RT. Além disso, a metodologia utilizada para a tomada dos valores

de  $\rho_{agg}$  está sujeita a erros ligados à impermeabilização, à pesagem, à espessura da camada de material impermeabilizante e à precisão com que as estimativas do teor de água residual são feitas para a correção da massa do solo. A correção da massa do agregado pelo teor de água é feita utilizando o teor de água de agregados diferentes daqueles que sofreram impermeabilização. Estes fatores, associados ao fato da provável ocorrência de uma similar distribuição e frequência de agregados do tamanho utilizado para determinar a  $\rho_{agg}$ , podem justificar os resultados para a propriedade dos agregados.

### 3.5 Carbono orgânico do solo (COS)

Os valores médios de COS nas diferentes posições de amostragem são mostrados na Figura 6.



**Figura 6.** Valores médios de carbono orgânico do solo nos tratamentos linha, ponto intermediário e entrelinha. Letras maiúsculas comparam as médias entre as posições de amostragem dentro da camada e letras minúsculas entre camadas dentro de cada posição de amostragem. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Constatou-se que o teor de COS não se diferenciou ( $p > 0,05$ ) entre as posições de amostragem, enquanto que a camada de 0-10 cm apresentou maiores teores de COS que na camada de 10-20 cm ( $p < 0,05$ ). Os maiores teores de COS na camada superficial têm sido constatado por vários autores. O sistema plantio

direto apresenta maior valor médio de matéria orgânica na camada superficial, por causa da manutenção dos restos da cultura anterior na superfície e pela reduzida mobilização do solo apenas na linha de plantio, facilitando o acúmulo da matéria orgânica pela decomposição da palhada. Por outro lado, a queda do teor de matéria orgânica na camada de 10-20 cm, em comparação com a camada de 0-10 cm, se deve ao acúmulo de material orgânico na superfície em razão do longo tempo sob sistema de plantio direto (Figura 6). Estes resultados estão em acordo com Marcolan e Anghinoni (2006).

### 3.6 Inter-relações entre a resistência tênsil de agregados (RT), a friabilidade do solo (F), a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e o carbono orgânico do solo (COS)

Os dados mostrados na Tabela 2 indicam que a RT foi positiva e significativamente relacionada com a densidade de agregados e COS e que não houve correlação significativa entre as outras variáveis.

**Tabela 2.** Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade do solo (F), densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e carbono orgânico (COS) para classe de diâmetro de agregados de 12.5-19,0 mm para as duas camadas estudadas.

|                                | <b>F</b>       | <b><math>\rho_{agg}</math></b> | <b>COS</b>      |
|--------------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------|
| <b>RT</b>                      | 0,20<br>(0,12) | 0,28<br>(0,02)                 | 0,44*<br>(0,01) |
| <b>F</b>                       |                | 0,02<br>(0,86)                 | 0,22<br>(0,09)  |
| <b><math>\rho_{agg}</math></b> |                |                                | 0,15<br>(0,22)  |

\* Indica valores de correlação positiva entre atributos.

<sup>(1)</sup> Indica valores de probabilidade de significância.

Em solo similar, mas com diferentes amplitudes de COS, Guimarães et al. (2009) verificaram correlação positiva entre RT e COS para valores de COS similares aos obtidos neste estudo. Para a classe de tamanho de agregados estudada, o aumento de RT com o incremento de COS sugere que, para a faixa de valores de COS medido, o mesmo atua mais como agente cimentante do que agregante. Possíveis interações entre minerais da fração argila com o COS podem influenciar este comportamento. Resultados distintos foram obtidos por

Blanco-Canqui et al. (2005) através da correlação geral entre RT e COS, em solos de região temperada e avaliando tamanhos de agregados distintos daqueles deste trabalho. Por outro lado, estes resultados diferem dos obtidos por Imhoff et al. (2002), provavelmente, por utilizarem solos com faixa menos ampla de teor de COS.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que:

1. Não houve diferença de RT entre as posições de amostragem, mas comparando as camadas de 0-10 e 10-20 cm, os valores de RT são maiores na entrelinha e ponto intermediário;
2. A friabilidade do solo foi maior na posição linha da camada de 0-10 cm, comparado com as posições de amostragem relativas à entrelinha e ponto intermediário;
3. A densidade dos agregados não distinguiu as posições de amostragem e os teores de COS foram influenciados pela camada amostrada, sendo maiores na camada de 0-10 cm.

#### **IV- CAPÍTULO 3 - ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE DIFERENTES TAMANHOS DE AGREGADOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO E FLORESTA NATIVA**

##### **RESUMO**

A implantação de sistemas agrícolas em substituição às florestas promove drásticas alterações na estrutura do solo. Estudos envolvendo áreas cultivadas por longo tempo em comparação com solos sob floresta nativa contribuem para compreender os impactos dos sistemas agrícolas em atributos estruturais do solo. O objetivo foi avaliar o impacto ao longo prazo do sistema plantio direto sobre a estrutura do solo, tendo como comparativo um solo sob floresta nativa. A amostragem do solo foi conduzida em março de 2011, numa área agrícola comercial do município de Maringá, Estado do Paraná, em duas áreas: SPD implantado a cerca de 30 anos e floresta nativa. A amostragem do solo consistiu-se da coleta de 40 blocos de solo (10 cm x 10 cm x 10 cm), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. No laboratório, foram obtidos agregados com diâmetros de 2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm. Para estas diferentes classes de diâmetro dos agregados, foi determinada a RT de 4800 agregados, sendo utilizada para estimar a F. Determinou-se a  $\rho_{agg}$  de 400 agregados da classe de diâmetro 16-19 mm. Foram realizadas determinações do teor de COS para as amostras dos agregados de cada sistema de manejo e para todas as classes de diâmetro dos agregados estudados. Observou-se que, conjuntamente à redução do diâmetro dos agregados, ocorreu um acréscimo nos valores da RT, para agregados entre 2 e 4 mm. No solo sob floresta nativa, foi constatada a maior magnitude deste acréscimo. Os maiores valores de RT são condizentes com o maior teor de COS também verificado sob floresta nativa. De modo geral, observou-se o decréscimo da  $\rho_{agg}$  no solo sob floresta nativa, quando comparado ao solo sob SPD. Em solo sob floresta nativa, os agregados apresentaram maiores teores de COS, diferindo-se do SPD. Independentemente do sistema de uso e manejo, o solo foi classificado como friável ou muito friável.

**Palavras-chaves:** resistência tênsil, densidade de agregados, estrutura do solo.

## ABSTRACT

The replacement of forest by agricultural systems promotes drastic changes in soil structure. Studies of cultivated areas for a long time compared with soils under natural forest might contribute to understanding the impacts of agricultural systems on soil structural attributes. The objective was to evaluate the impact of long-time no-tillage on soil structure compared to native forest. Soil sampling was conducted in March 2011 in a commercial farming area in the municipality of Maringá, Paraná State, in two adjacent areas under no-tillage (NT) and native forest. The soil sampling consisted of randomly opening of 10 mini-trenches which were collected in 40 soil blocks of dimensions 10 x 10 x 10 cm, at 0-10 and 10-20 cm depth. In each system of use, it was determined tensile strength (TS) to 4800 soil aggregates with diameters of 2-4, 4-8, 8-16, 16-19, 19-25 mm, with the results of RT was calculated friability (F) for 16-19 mm diameter and density of aggregates ( $\rho_{agg}$ ) aggregates to 400 diameter 16-19 mm. Also determinations were made of the total organic carbon content of the soil (SOC) to assess its relationship to RT. The results indicated that the reduction in joint diameter of the aggregate was increased RT values whose magnitude is larger aggregates to between 2 and 4 mm in the native forest soil. The highest values of TS in the soil under native forest are in according with the highest level SOC also verified in this management system. In general, we observed a decrease in  $\rho_{agg}$  in native forest compared to cultivated soil under no tillage (NT). In native forest aggregates showed higher SOC concentrations, differing from the NT. Regardless of system use and management, the soil was classified as friable or very friable.

**Keywords:** tensile strength, density of aggregates, soil physical quality.

## 1. INTRODUÇÃO

A compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. De acordo com Sanchez (1981), avaliações das modificações no solo, decorrentes do cultivo, deveriam ser feitas submetendo um solo sob vegetação natural às explorações agrícolas desejadas e analisando suas propriedades ao longo do tempo. Apesar de esta estratégia ser a mais desejável, por diferentes razões, é difícil a realização destas condições experimentais. Alternativamente, estes estudos podem ser feitos utilizando solos cultivados e sob floresta nativa, desde que mantidos os critérios genéticos e topográficos relacionados com a formação dos solos. No Brasil, têm sido feitos alguns estudos avaliando as mudanças nas propriedades dos solos utilizando o solo sob floresta como referência (SILVA e RIBEIRO, 1992; ARAÚJO et al., 1998; DIAS JUNIOR e ESTANISLAU, 1999; SANCHES et al., 1999; BORGES et al., 1999; ARAUJO et al., 2004).

A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa um desequilíbrio no ecossistema, modificando as propriedades do solo, cuja intensidade varia com as condições de clima, uso e manejos adotados e a natureza do solo. Com o uso intensivo dos solos, geralmente ocorre a deterioração das suas propriedades físicas, resultando em modificações na densidade e na porosidade do solo, que podem variar consideravelmente, dependendo da textura, dos teores de matéria orgânica e da frequência de cultivo do solo (HAJABBASI et al., 1997).

O entendimento do impacto de sistemas de manejo nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados é fundamental para o manejo sustentável do solo. Em sistemas agropecuários, como plantio direto, os impactos da degradação física dos solos estão relacionados às forças mecânicas resultantes do tráfego de máquinas e implementos agrícolas (SILVA et al., 2003; STRECK et al., 2004).

A avaliação da qualidade estrutural dos solos agrícolas tem assumido importância cada vez maior, principalmente em áreas sob sistema plantio direto, uma vez que ocorrem importantes alterações na estrutura do solo (KLEIN et al.,

2009). Estas alterações têm sido avaliadas através de indicadores como a resistência tênsil dos agregados, friabilidade do solo e densidade dos agregados, os quais têm se mostrado um indicador sensível às mudanças ocorridas na qualidade estrutural do solo.

Atualmente, no Brasil, a área sob semeadura direta é estimada em cerca de 26 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2008). Neste sistema de manejo, deve-se dispor de estratégias para o controle da qualidade física e estrutural dos solos. Entre estas, a utilização de rotação de culturas com o uso de culturas de cobertura do solo é prática fundamental para a manutenção da qualidade física e estrutural do solo, comparada à sucessão de culturas. Os efeitos da rotação de culturas do ponto de vista físico refletem na formação de poros e na estabilidade da estrutura para garantir a qualidade e a sustentabilidade do sistema de semeadura direta nos solos tropicais e subtropicais.

As avaliações da qualidade estrutural dos solos foram realizadas por meio do estudo de propriedades ligadas à forma e à estabilidade estrutural do solo, como a densidade e a porosidade do solo (BERTOL et al., 2004), a resistência do solo à penetração (TORMENA et al., 1998) e a distribuição dos agregados em tamanhos ou sua estabilidade à água (CARPENEDO e MIELNICZUK, 1990). Em adição a estes atributos, a resistência tênsil de agregados do solo também pode ser utilizada como um indicador dos efeitos do manejo na qualidade estrutural do solo (TORMENA et al., 2008a). A resistência tênsil (RT) é definida como a força por unidade de área necessária para causar o fraturamento dos agregados (DEXTER e WATTS, 2000). De acordo com Dexter e Kroesbergen (1985), a resistência tênsil é, provavelmente, a mais útil medida de resistência individual dos agregados do solo, porque pode ser determinada por um teste simples numa ampla variação de tamanhos de agregados, consistindo num indicador muito sensível da condição estrutural do solo (DEXTER e KROESBERGEN, 1985). A medida da resistência tênsil reflete a hierarquia dos agregados na estrutura do solo, de modo que o fraturamento dos agregados maiores ocorre nos planos de fraqueza, derivados das fissuras e microfissuras que formam zonas de menor resistência. Detalhes em relação aos métodos de medida

da resistência tênsil são descritos em Dexter & Kroesbergen (1985), Watts & Dexter (1998) e Dexter & Watts (2000).

A partir das medidas de resistência tênsil de agregados, pode-se quantificar a friabilidade do solo (F), outra importante medida da qualidade estrutural. A heterogeneidade da resistência resultante dos planos de fraqueza ou zonas de falhas dentro dos agregados é identificada como friabilidade do solo (DEXTER e WATTS, 2000). A friabilidade do solo é considerada uma importante propriedade física dos solos agrícolas, uma vez que a condição de solo “friável” é desejável para um adequado estabelecimento das plantas.

Silva et al. (2003) definem a densidade do solo como um seu importante atributo físico, o qual fornece indicações a respeito do estado de conservação e é uma das primeiras propriedades a ser alterada pelos sistemas de uso e manejo do solo. Ela pode ser determinada diretamente sobre os agregados do solo e tem sido utilizada na avaliação de atributos nos quais se faz o uso de medidas de volume do solo (MUNKHOLM e KAY, 2002; MUNKHOLM e SCHJØNNING, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2005).

Segundo Tormena et al. (2004), o carbono orgânico do solo (COS) também desempenha um papel importante na sua qualidade e tem relação com outras propriedades físicas do solo. Sua influência sobre os atributos do solo e sobre a sensibilidade às práticas de manejo determina que seja considerada um dos principais parâmetros na avaliação da sua qualidade. (DORAN e PARKIN, 1994). Tormena et al. (2008b), ao avaliarem a qualidade física do solo em diferentes sistemas de uso, verificaram que o teor de COS caracterizou a redução da sua qualidade, proporcionalmente à intensidade da sua utilização. O teor de COS está relacionado à RT do solo, pois proporciona uma maior estabilidade estrutural dos seus agregados. De acordo com Kay e Angers (1999), o carbono orgânico influencia o comportamento físico do solo, sendo que a forma e a estabilidade da estrutura melhoram com o aumento do teor de carbono.

Neste estudo, estabeleceu-se a hipótese de que o uso agrícola de um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto, em comparação com solo sob floresta nativa, promove aumentos da RT e densidade de agregados bem como

reduções nos teores de COS e F. Assim, o objetivo foi avaliar o impacto ao longo prazo do SPD sobre a estrutura do solo, tendo como referência um solo sob floresta nativa.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área experimental e descrição de manejo do solo

Este trabalho foi realizado numa área agrícola comercial (23°30'31" S e 51°59'31" W) e numa área de floresta nativa (23°29'12" S e 52°0'11" W), localizada no município de Maringá, Estado do Paraná, apresentando relevo plano (declividade média de 3 %), com altitudes entre 445,62 e 479,02 m (Figura 1).



**Figura 1.** Vista panorâmica área agrícola comercial e floresta nativa. **Fonte:** Google Earth, 2011.

Segundo a classificação de Köppen (EMBRAPA, 1984), nesta região o tipo climático dominante é caracterizado como Cfa (subtropical úmido mesotérmico), com médias anuais de temperatura e precipitação de 22 °C e 1450 mm, respectivamente. O solo foi identificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), (EMBRAPA, 2006). A análise granulométrica, realizada em amostras retiradas na camada de 0-20 cm, indicou valores de 132 g kg<sup>-1</sup> de areia grossa, 105 g kg<sup>-1</sup> de areia fina, 96 g kg<sup>-1</sup> de silte e 667 g kg<sup>-1</sup> de argila, enquadrando-se na classe textural muito argilosa (EMBRAPA, 2006).

Selecionaram-se duas áreas, sendo uma sob floresta nativa e a outra cultivada, utilizando sistema plantio direto implantado desde 1979, a qual iniciou com um sistema de rotação de culturas, sendo soja/trigo/milho/aveia. Ao longo de mais de 30 anos de SPD, foram feitas correções de solos, com a aplicação de calcário dolomítico ou calcítico, em doses variáveis, conforme resultados das análises de solos. As aplicações de corretivos sempre foram feitas ao lanço e em superfície, sem qualquer incorporação mecânica. Atualmente, o sistema de rotação envolve as culturas de milho/aveia/soja/milho safrinha/soja/trigo. A cultura de aveia é semeada em linhas, utilizando a mesma semeadora disponível para a cultura de trigo.

## **2.2 Amostras do solo e preparação de agregados do solo**

A amostragem de solo foi conduzida em março de 2011, e consistiu na abertura aleatória de 10 mini-trincheiras em dois sistemas de manejo: sob sistema plantio direto, envolvendo a cultura do milho (*Zea mays* L.), e sob floresta nativa, considerada como referência de qualidade estrutural do solo. Foram amostrados um total de 40 (2 tratamentos X 2 profundidades X 10 repetições) blocos de solo de dimensões 10 x 10 x 10 cm, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade. Os blocos de solo foram acondicionados em sacos plásticos, identificados e transportados para o laboratório. No laboratório, os blocos de solo (amostras) foram fragmentados manualmente em seus agregados naturais. No processo de quebra manual foi aplicada somente a força mínima necessária para fraturar os agregados em seus pontos de fraqueza pré-existentes. As amostras foram passadas por um conjunto de peneiras para reter agregados com diâmetros de 2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm. Depois de obtidos os diferentes tamanhos de agregados, foram colocados em bandejas de alumínio e encaminhados para secagem a 60 °C, durante 24 horas, para homogeneização da umidade. Depois de homogeneizada a umidade, os agregados foram acondicionados em caixas plásticas para armazenamento até a determinação da resistência tênsil e densidade dos agregados.

### 2.3 Determinação da resistência tênsil de agregados (RT)

A resistência tênsil de agregados individual foi determinada usando o método proposto por DEXTER e KROESBERGEN (1985) e DEXTER e WATTS (2000). Um total de 4800 agregados (2 tratamentos X 10 repetições X 40 agregados por repetição X 2 profundidades X 1 classe de diâmetro; 19-25 mm) + (2 tratamentos X 10 repetições X 20 agregados por repetição X 2 profundidades X 4 classes de diâmetro; 16-19, 8-16, 4-8 e 2-4 mm) foi utilizado para o teste de RT, conforme metodologia encontradas em Tormena et al. (2008a, 2008b). Cada agregado foi pesado em balança analítica e, em seguida, submetido, individualmente, a um teste de tensão indireta, a uma velocidade constante de  $1,55 \text{ mm s}^{-1}$  e com controle automatizado, sendo utilizado um dinamômetro digital eletrônico de precisão, composto por célula de carga com carga nominal de 20 kgf. O aparelho utilizado para este estudo é descrito por FIGUEIREDO et al. (2011). As medidas foram determinadas em agregados colocados na posição mais estável, sendo visível a formação de uma fissura contínua ao longo do diâmetro polar do agregado, após a aplicação da carga compressiva.

A RT foi calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 (P/D^2) \quad (1)$$

Em que RT é a resistência tênsil, usualmente representada em kPa; 0,576, o coeficiente de proporcionalidade que reflete a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P, a força necessária para a quebra tênsil do agregado (N); e D, o diâmetro efetivo (m).

O diâmetro efetivo(D) foi calculado conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$D = Dm (M/M_0)^{1/3} \quad (2)$$

Sendo Dm é o diâmetro médio dos agregados (mm), definido pela média do tamanho das peneiras utilizadas para selecionar os agregados; M é a massa do agregado individual (g);  $M_0$ , a massa média dos agregados em cada tratamento

(g). No final de cada teste da RT, uma subamostra dos agregados de cada amostra foi utilizada para determinação da umidade residual do solo.

#### **2.4 Estimativa da friabilidade do solo (F)**

A friabilidade foi estimada através de agregados da classe de diâmetros 16-19 mm, pelo método do coeficiente de variação proposto por Watts e Dexter (1998). Neste método os valores F são obtidos através do coeficiente de variação dos valores medidos de RT em cada tratamento:

$$F = \frac{\sigma Y}{Y} \pm \frac{\sigma Y}{Y \sqrt{2n}} \quad (3)$$

Onde F é a friabilidade do solo;  $\sigma Y$ , o desvio-padrão dos valores medidos da RT;  $Y$ , a média dos valores medidos de RT; e  $n$ , o número de repetições. O segundo termo é o erro-padrão do coeficiente de variação.

As classes de friabilidade utilizadas neste trabalho foram tomadas com base nos valores de F (adimensional) propostos por Imhoff et al., (2002): não friável (< 0,01), ligeiramente friável (0,10–0,20), friável (0,20–0,50), muito friável (0,50–0,80) e mecanicamente instável (> 0,80).

#### **2.5 Determinação da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )**

A densidade de agregados individuais foi medida usando o método do torrão impermeabilizado, segundo Grossman e Reinsch (2002). A substância utilizada para impermeabilizar o agregado foi parafina com uma densidade de 0,9 g cm<sup>-3</sup>. Um total de 400 agregados (2 tratamentos X 10 repetições X 10 agregados por repetição X 2 profundidades X 1 classe de diâmetro; 16-19 mm) foi utilizado para medir a  $\rho_{agg}$ . Os agregados foram amarrados com linha de costura, pesados e cobertos com parafina na temperatura de 60° C. Após cobertos, os agregados foram pesados antes de fazer a sua imersão em água destilada a 25°C. Após a imersão, os agregados são novamente pesados para determinar sua perda de massa, sendo que a perda de massa é igual ao volume dos agregados. Para o cálculo do volume dos agregados, deverá ser feita a

correção para o volume de parafina que aderiu à superfície dos agregados (EMBRAPA, 2006).

## **2.6 Determinação do carbono orgânico do solo (COS)**

O carbono orgânico do solo foi determinado usando o método de Walkley e Black, conforme EMBRAPA (2007). No final de cada teste da RT, foi utilizada uma subamostra de agregados de cada tratamento, classe de diâmetro e repetição, conforme Tormena et al. (2008a) e Guimarães et al. (2009). Um total de 200 amostras (2 tratamentos X 10 repetições X 1 Alíquota por repetição X 2 profundidade X 5 classes de diâmetro; 2-4; 4-8; 8-16; 16-19; e 19-25 mm) foi utilizada para determinar o COS.

## **2.7 Análise estatística**

Os valores originais das variáveis RT e COS foram submetidos às análises de variância e teste para comparação de médias, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos, duas profundidades e dez repetições (blocos de solo), conforme Blanco-Canqui et al. (2005). As análises de variância atenderam às pressuposições básicas de distribuição normal dos resíduos, pelo teste Shapiro-Wilk ( $p > W > 0,05$ ), e de homocedasticidade das variâncias, pelo teste de Levene ( $p > 0,05$ ). Diferenças entre valores das variáveis foram comparadas usando o teste Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). Estes testes estatísticos de médias foram realizados usando o programa Sisvar (FERREIRA, 2007). As análises estatísticas das pressuposições básicas e de correlações entre os atributos físicos e mecânicos do solo foram realizadas por meio do programa estatístico SAS (SAS, 2001).

# **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## **3.1 Momentos Estatísticos.**

Os momentos estatísticos para RT e COS são apresentados na Tabela 1. Os resultados do teste de normalidade indicaram que a RT apresentou distribuição log-normal ( $p > W > 0,05$ ), independentemente dos sistemas de uso e

manejo do solo e a camada. Esses resultados são semelhantes aos de Imhoff et al. (2002), Blanco-Canqui et al. (2005) e Tormena et al. (2008b). Entretanto, Dexter e Watts (2000) e Guimarães et al. (2009) verificaram distribuição normal para a RT. Em relação ao COS, foi constatada distribuição normal ( $p > W > 0,05$ ) desta variável nos tratamentos estudados. A dispersão dos dados da log RT foi homogênea entre os tratamentos (Plantio Direto e Floresta Nativa), confirmada pelo teste de homocedasticidade de Levene ( $p > 0,05$ ) (Vieira, 1999), como também foi verificado por Tormena et al. (2008a).

**Tabela 1.** Momentos estatísticos da resistência tênsil de agregados (RT) e do carbono orgânico do solo (COS) independente dos sistemas de manejo plantio direto e floresta nativa para as classes de diâmetro de agregados (2-4, 4-8, 8-16, 16-19 e 19-25 mm) utilizadas neste estudo.

| Indicador                 | Média  | CV (%) | Desv. Pad. | Mín   | Max     | F –Levene          | W – Shapiro-Wilk   |
|---------------------------|--------|--------|------------|-------|---------|--------------------|--------------------|
| <b>0-10 cm</b>            |        |        |            |       |         |                    |                    |
| RT (kPa)                  | 225,22 | 106,03 | 238,81     | 22,16 | 1146,12 | 3,92*              | 0,71*              |
| log RT                    | 4,93   | 20,02  | 0,98       | 3,09  | 7,04    | 2,01 <sup>ns</sup> | 0,99 <sup>ns</sup> |
| COS (g dm <sup>-3</sup> ) | 19,94  | 29,91  | 5,96       | 8,14  | 37,02   | 1,84 <sup>ns</sup> | 0,98 <sup>ns</sup> |
| <b>10-20 cm</b>           |        |        |            |       |         |                    |                    |
| RT (kPa)                  | 193,65 | 102,03 | 197,60     | 20,16 | 739,98  | 14,33*             | 0,88*              |
| log RT                    | 4,78   | 20,61  | 0,98       | 3,00  | 6,59    | 1,62 <sup>ns</sup> | 0,98 <sup>ns</sup> |
| COS (g dm <sup>-3</sup> ) | 11,14  | 25,85  | 2,88       | 4,89  | 19,76   | 1,24 <sup>ns</sup> | 0,98 <sup>ns</sup> |

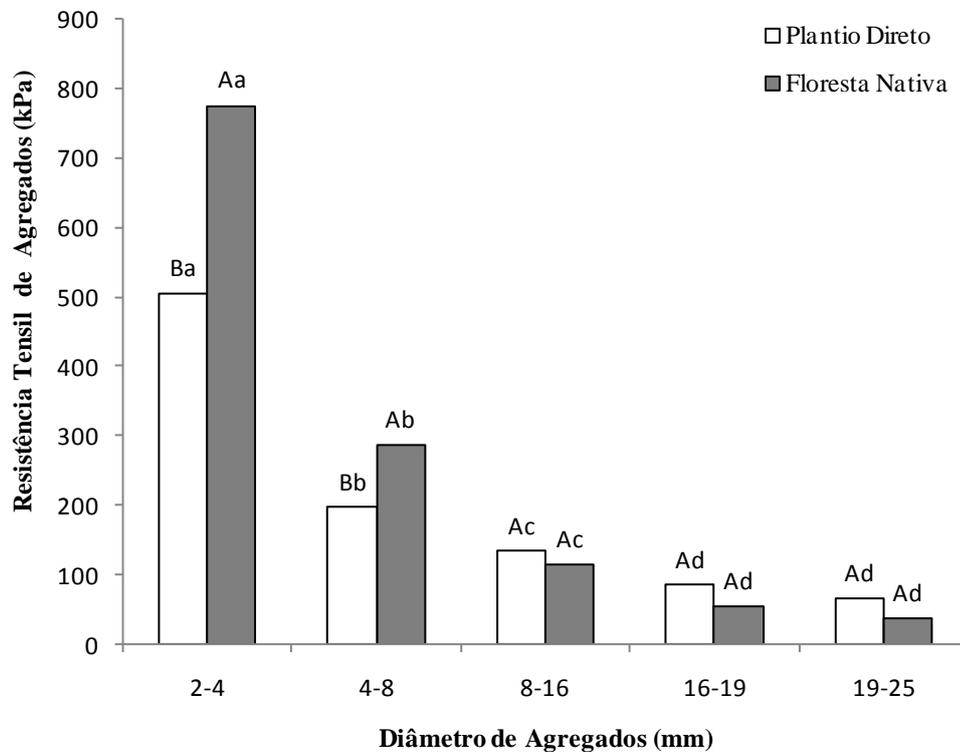
\* indica valores de ( $P < 0,05$ ) para os testes de Levene e Shapiro-Wilk inferiores a 0,05 indicando falta de homogeneidade da variância e ou normalidade dos resíduos.

<sup>ns</sup> indica valores de ( $P > 0,05$ ) para os testes de Levene e Shapiro-Wilk superiores a 0,05 indicando que os dados apresentam homogeneidade da variância e distribuição normal dos resíduos.

### 3.2 Resistência tênsil de agregados (RT)

Os resultados mostram um aumento gradativo nos valores de RT com a diminuição do diâmetro médio dos agregados em cada sistema de uso e manejo do solo (Figura 2). Os maiores valores de RT, verificados com a redução da classe de diâmetro, devem-se ao fato dos menores agregados possuírem menor

quantidade de zonas de fraqueza ou fissuras. Isto é estabelecido pelo princípio de exclusão de poros amplamente reconhecido na literatura, que implica na menor possibilidade de formação de fissuras e microfissuras nesta classe de diâmetro de agregados, conforme estabeleceu Dexter (1988).



**Figura 2.** Valores médios de resistência tênsil de agregados nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada de 0-10 cm de profundidade. Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos dentro da mesma classe de diâmetro dos agregados e letras minúsculas comparam as médias entre diâmetros dos agregados do mesmo tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

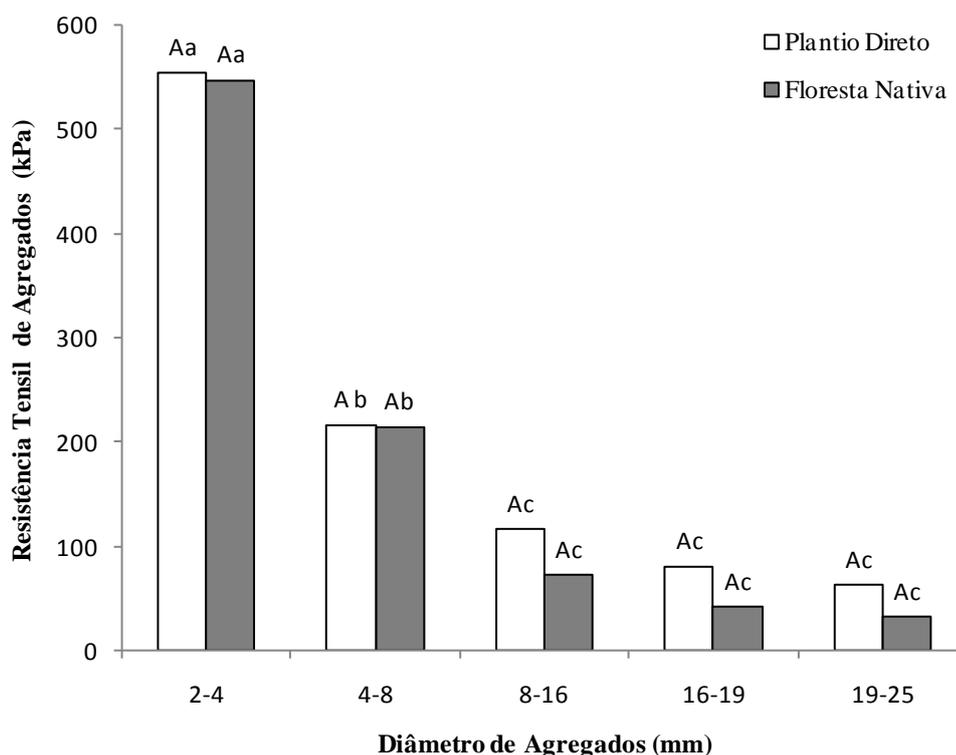
Em relação aos sistemas de uso do solo (Plantio direto e Floresta nativa), verifica-se na Figura 2 que os valores de RT foram diferentes entre os tratamentos para agregados com classe de diâmetro menor que 8 mm, sendo que os maiores valores foram verificados no solo sob floresta nativa. Comportamento similar foi constatado por Blanco-Canqui et al. (2005). Para agregados das classes de diâmetro maiores e igual a 8 mm, não foi verificada diferença entre os tratamentos. Os maiores valores de RT no solo sob floresta nativa não são justificados pela densidade dos agregados, como será discutido neste trabalho.

No entanto, os valores de COS aumentaram nos agregados do solo sob floresta nativa, em comparação com o plantio direto.

Uma hipótese para explicar o aumento da RT, apesar do maior teor de COS dos agregados menores que 8 mm no solo sob floresta nativa, é a possibilidade de que, além da quantidade, a qualidade físico-química do COS seja distinta do solo sob plantio direto. Esta hipótese é reforçada pelo trabalho de Beare et al. (1994) que indicam que os macroagregados estabelecem importantes mecanismos de proteção do COS, reduzindo a sua mineralização e aumentando o seu efeito na agregação do solo. Neste sentido, Six et al. (2000) indicam que um decréscimo do COS resulta em perda da estabilidade, que pode estar ligada com o poder cimentante da COS nos agregados maiores que 8 mm, que é dependente das suas características e interação do COS com os minerais da fração argila.

Para agregados com amplitude de tamanho maior de 8 mm, os resultados deste trabalho concordam com os de Zhang (1994) e Tormena et al. (2008b), os quais indicam redução da resistência tênsil dos agregados do solo com o aumento do carbono orgânico deste que decorreu do aumento da porosidade dos agregados. Este é o provável mecanismo envolvido no comportamento da RT no presente estudo para agregados maiores que 8 mm. O menor incremento da RT verificado em agregados menores que 8 mm, no tratamento plantio direto, está relacionado, provavelmente, à mobilização reduzida na camada superficial do solo, visto que o sistema plantio direto é um sistema sustentável e conservacionista.

Na camada de 10-20 cm, os resultados mostram o mesmo comportamento anteriormente descrito, onde ocorre um aumento gradativo nos valores de RT com a diminuição do diâmetro médio dos agregados em cada sistema de uso e manejo do solo (Figura 3). Por outro lado, quando realizada a análise para a comparação de médias entre tratamentos, não foi evidenciada diferença ( $P > 0,05$ ) significativa entre tratamentos, independente do tamanho do agregado. No entanto, tanto no solo sob sistema de plantio direto, como floresta nativa foram constatadas diferenças significativas de RT entre os tamanhos de agregados menores que 8 mm.



**Figura 3.** Valores médios de resistência tênsil de agregados nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 10-20 cm de profundidade. Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos dentro da mesma classe de diâmetro dos agregados e letras minúsculas comparam as médias entre diâmetros dos agregados do mesmo tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

### 3.3 Friabilidade do solo (F)

Os valores médios, máximos e mínimos de F nos tratamentos estudados são mostrados na Tabela 2. A ocorrência de menores valores de F indica que o solo pode ser fraturado em fragmentos de tamanho arbitrário (muito grandes ou muito pequenos), quando submetido a qualquer ação mecânica, resultando em um meio físico inadequado para a germinação e crescimento das plântulas. Por outro lado, valores excessivamente elevados de F indicam a possibilidade de o solo sofrer intenso fraturamento, quando uma mínima força é aplicada, razão pela qual é imprópria sua utilização em culturas agrícolas mecanizadas (UTOMO e DEXTER, 1981; MACKS et al., 1996). Assim, neste trabalho, os tratamentos foram classificados como friável, em SPD, e muito friável, em floresta nativa na camada de 0-10 cm, e friável tanto no SPD como na floresta nativa na camada de

10-20 cm. Isso evidencia a existência de condições físicas adequadas para a camada de semeadura independente do tratamento. A ocorrência de solo muito friável sob floresta indica agregados mais porosos do que no solo sob SPD, em função dos estresses físicos e mecânicos a que o solo sob SPD está submetido.

**Tabela 2.** Valores de Friabilidade <sup>(1)</sup> estimados para agregados com diâmetros entre 16-19 mm nos tratamentos plantio direto e floresta nativa.

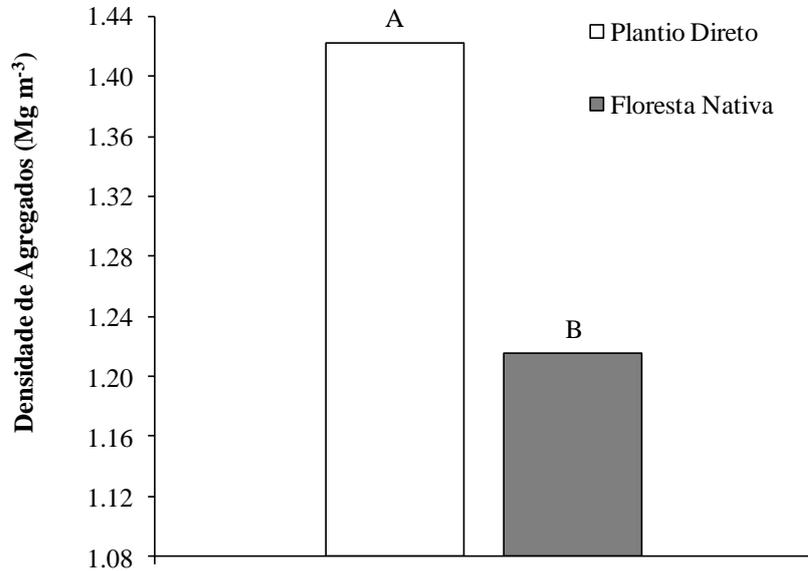
| <b>Tratamento</b> | <b>Média</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> | <b>DP</b> | <b>CV (%)</b> |
|-------------------|--------------|---------------|---------------|-----------|---------------|
| <b>0 – 10 cm</b>  |              |               |               |           |               |
| Plantio Direto    | 0,356        | 0,300         | 0,412         | 0,064     | 17,98         |
| Floresta Nativa   | 0,574        | 0,483         | 0,665         | 0,154     | 26,83         |
| <b>10 – 20 cm</b> |              |               |               |           |               |
| Plantio Direto    | 0,354        | 0,298         | 0,410         | 0,069     | 19,49         |
| Floresta Nativa   | 0,397        | 0,334         | 0,459         | 0,092     | 23,17         |

<sup>(1)</sup> Friável ( $0,20 < F < 0,50$ ) e muito friável ( $0,50 < F < 0,80$ ).

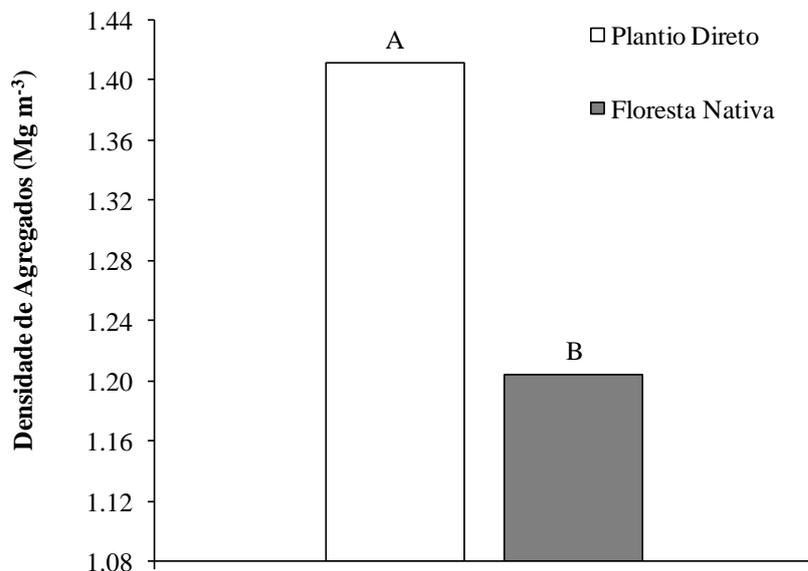
Os valores de F deste trabalho estão em acordo com Watts e Dexter (1998), os quais indicam que solos não cultivados, tais como sistemas sob pastagem ou floresta nativa, são mais friáveis do que solos cultivados. Fatores do solo que influenciam positivamente a friabilidade incluem redução das concentrações de argila dispersa, (SHANMUGANATHAN e OADES, 1982), redução do teor de carbono orgânico e diminuição da densidade (MACKS et al., 1996). Estes fatores podem justificar a maior friabilidade do solo sob floresta nativa na camada de 0-10 cm, apesar de que, independente dos tratamentos e camadas estudadas, o grau de friabilidade indica boas condições físicas e estruturais do solo.

### 3.4 Densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ )

Os valores médios da densidade de agregados na camada de 0-10 e 10-20 cm são mostrados nas figuras 4 e 5.



**Figura 4.** Valores médios de densidade de agregados nos tratamentos, plantio direto e floresta nativa na camada 0-10 cm profundidade. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.



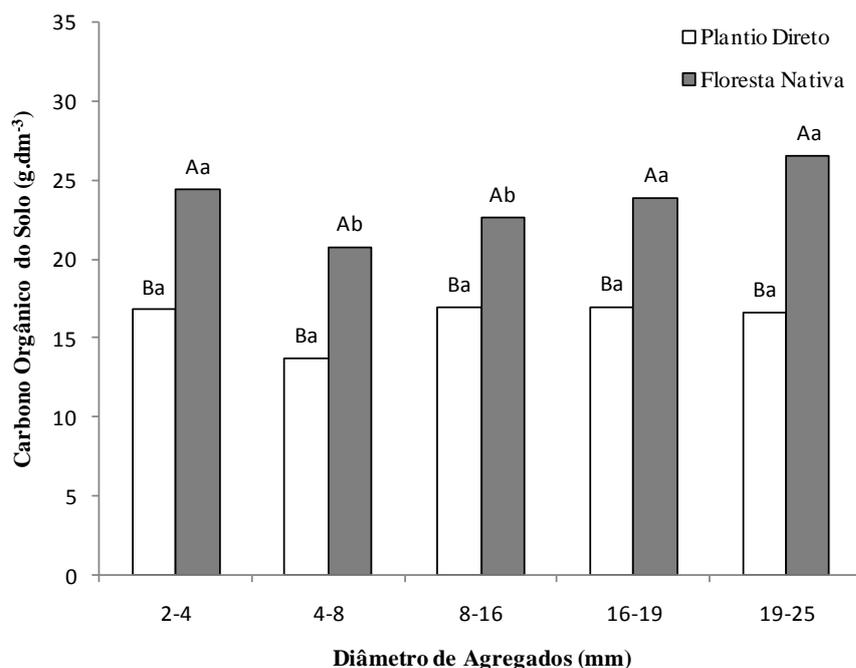
**Figura 5.** Valores médios de densidade de agregados nos tratamentos, plantio direto e floresta nativa na camada 10 – 20 cm de profundidade. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Tanto na camada de 0-10 cm como 10-20 cm de profundidade, verificou-se aumento da  $\rho_{agg}$  no solo sob plantio direto quando comparado ao solo sob floresta nativa. Isto pode ser decorrente da compactação do solo pelo tráfego de máquinas e pela redução do carbono, que pode ser verificado na Figura 6. Estes resultados são compatíveis com os de Araujo et al. (2004) e Tormena et al. (2008a). A compactação no solo sob sistema plantio direto pode ter provocado coalescência dos agregados, aumentando a densidade individual e reduzindo o espaço poroso intra-agregado. Resultados similares foram também obtidos por Blanco-Canqui et al. (2005).

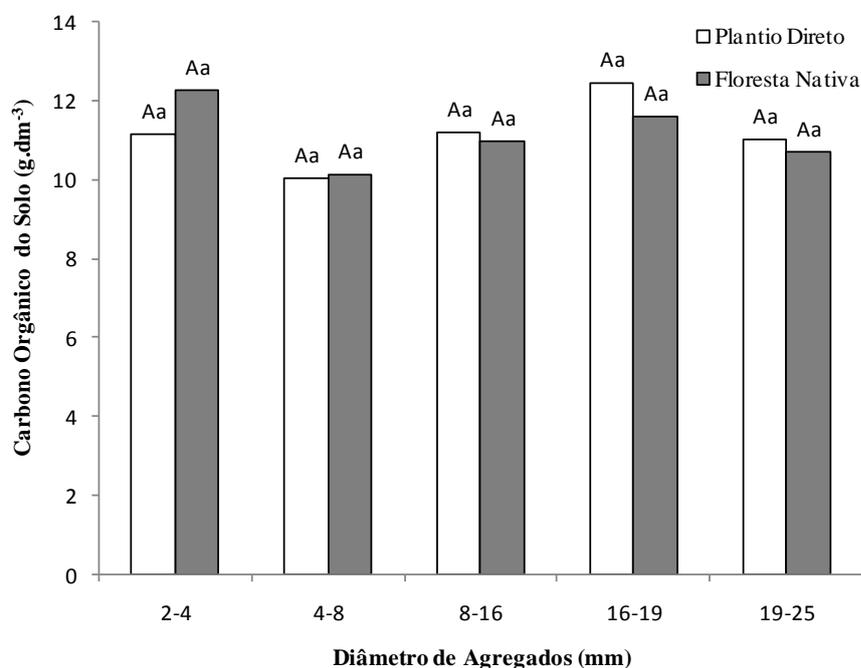
### **3.5 Carbono orgânico do solo (COS)**

Os teores de COS nos tratamentos e camadas estudadas são apresentados nas Figuras 6 e 7. Verifica-se que na camada de 0-10 cm os teores de COS do solo sob floresta nativa são maiores do que sob plantio direto. Por outro lado, na camada de 10-20 cm, não foram verificadas diferenças entre os tratamentos. Os maiores valores de COS na camada superficial do solo sob floresta nativa podem ter determinado a menor densidade de agregados, e maior friabilidade, especialmente na camada superficial. As equivalências de teores de COS entre o solo sob floresta nativa e sob SPD na camada de 10-20 cm podem ser decorrentes da habilidade do SPD em manter o COS no solo. Resultados similares podem ser constatados por Six et al. (2000), Blanco et al. (2005) e Tormena et al. (2008), os quais comparam sistemas cultivados com solo sob floresta nativa.

A comparação dos teores de COS nas diferentes classes de diâmetro de agregados em cada tratamento indica que, na camada de 0-10 cm, ocorreram menores teores de COS em 4-8 e 8-16 mm para o solo sob floresta nativa e nenhuma diferença entre do COS entre os tamanhos de agregados para o solo sob SPD. Na camada de 10-20 cm, nenhuma diferença foi constatada, independente dos tratamentos. Estes resultados revelam que há uma homogeneização na distribuição do COS nos diferentes tamanhos de macroagregados, conforme sugerem Six et al. (2000), revelando que os tratamentos têm impactos similares nos diferentes tamanhos de agregados.



**Figura 6.** Valores médios do carbono orgânico do solo de agregados nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 0-10 cm. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo dentro da camada e minúsculas entre diâmetros dos agregados do tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.



**Figura 7.** Valores médios do carbono orgânico do solo de agregados nos tratamentos plantio direto e floresta nativa na camada 10-20 cm. Letras maiúsculas comparam as médias entre os sistemas de manejo e minúsculas entre diâmetros dos agregados do mesmo tratamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 %.

Em acordo com os resultados obtidos neste estudo, Aratani et al. (2009) constataram melhor qualidade física do solo sob floresta nativa quando comparada com áreas submetidas à ação antrópica. Os autores citam que a substituição da floresta nativa por culturas anuais causa a redução do conteúdo de matéria orgânica em função do revolvimento do solo, que favorece a oxidação da matéria orgânica, a qual está diretamente relacionada aos teores de COS.

### 3.6 Inter-relações entre a resistência tênsil de agregados (RT) a friabilidade do solo (F), a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e o carbono orgânico do solo (COS)

Para cada tratamento, não se verificaram correlações significativas devido à reduzida amplitude de valores de algumas variáveis. Os valores de correlação geral entre as variáveis estudadas para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a resistência tênsil de agregados (RT), a friabilidade do solo (F), a densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) e o carbono orgânico do solo (COS) para as classes de diâmetro dos agregados utilizados, nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade.

|                                | <b>F</b>          | <b><math>\rho_{agg}</math></b> | <b>COS</b>      |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|
|                                | <b>0 – 10</b>     |                                |                 |
| <b>RT</b>                      | -0,59*<br>(0,005) | 0,85*<br>(<0,01)               | 0,20<br>( 0,39) |
| <b>F</b>                       |                   | -0,65*<br>(<0,01)              | 0,30<br>(0,19)  |
| <b><math>\rho_{agg}</math></b> |                   |                                | -0,34<br>(0,14) |
|                                | <b>10 – 20</b>    |                                |                 |
| <b>RT</b>                      | -0,15<br>(0,52)   | 0,88*<br>(<0,01)               | 0,25<br>(0,26)  |
| <b>F</b>                       |                   | -0,19<br>(0,40)                | 0,12<br>(0,58)  |
| <b><math>\rho_{agg}</math></b> |                   |                                | -0,22<br>(0,33) |

\*Indicam correlação significativa positiva ou negativa entre variáveis.

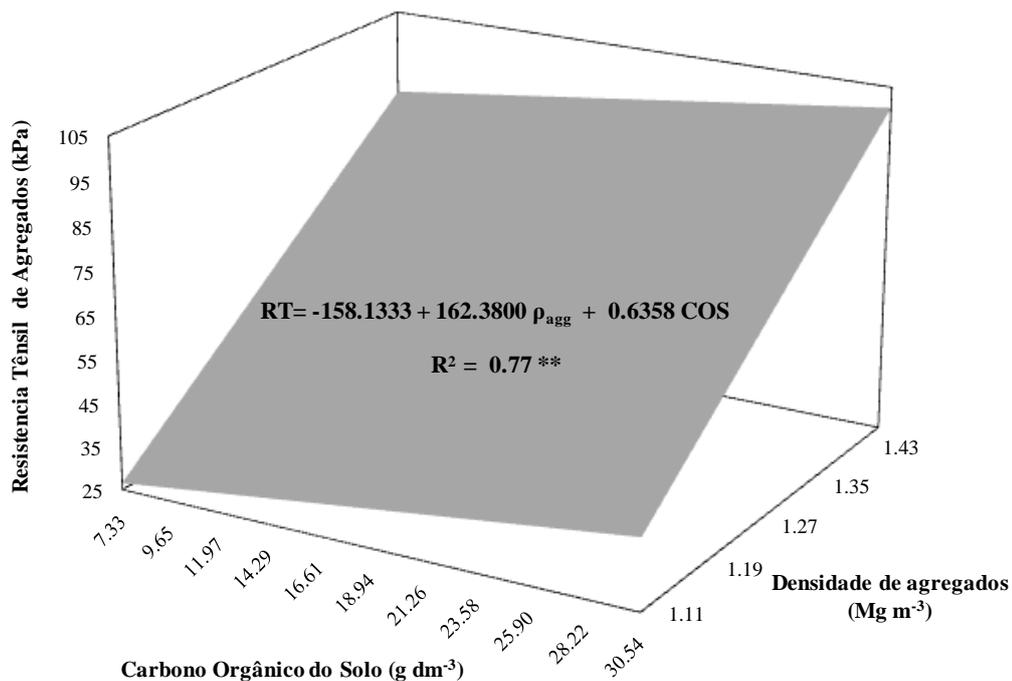
<sup>(1)</sup> Valores entre parênteses referem se a probabilidade de significância.

Os resultados indicam que houve uma correlação significativa e positiva entre RT e densidade de agregados, e significativa e negativa entre F e RT e F e densidade dos agregados na camada de 0-10 cm. Para a camada de 10-20 cm, foi

constatada apenas uma correlação significativa e negativa entre a RT e densidade dos agregados. Tal comportamento também foi observado por Blanco-Canqui et al. (2005) através da correlação geral entre RT e COS. Por outro lado, estes resultados diferem dos obtidos por Imhoff et al. (2002), provavelmente, por utilizarem solos com faixa menos ampla de teor de COS.

### 3.7 Superfície resposta relação do carbono orgânico do solo (COS) e da densidade de agregados ( $\rho_{agg}$ ) sobre a resistência tênsil de agregados (RT) da classe de diâmetro 16 -19 mm.

As relações entre resistência tênsil, densidade e teor de carbono orgânico do solo de agregados da classe de diâmetro 16-19 mm, nos sistemas de uso e manejo estudados, estão apresentadas na (Figura 7.).



**Figura 8.** Influência do carbono orgânico do solo e da densidade de agregados sobre a resistência tênsil de agregados para classe de diâmetro de 16-19 mm.

Verifica-se que o aumento do teor de COS resultou num acréscimo pouco pronunciado no valor da RT. Em contrapartida, quando se elevou a  $\rho_{agg}$ , ocorreu o aumento considerável da RT. Foi verificada a relação entre estes

atributos físicos e mecânicos do solo, indicando que processos que regem as variações de RT relacionados ao tamanho de agregados são dependentes dos teores de carbono orgânico do solo. Este comportamento do COS sobre a RT foi também constatado por Blanco-Canqui et al. (2005), Tormena et al. (2008b) e Ferreira et al. (2011), o qual está relacionado provavelmente com o efeito da matéria orgânica. Zhang (1994), citado por Tormena (2008a), indica que há dois efeitos contrários da matéria orgânica do solo sobre a resistência tênsil de agregados: o aumento no número e na força das ligações entre as partículas; e o efeito de diluição, que implica redução da densidade do solo ou aumento da porosidade do agregado. Além da quantidade de matéria orgânica do solo, ressalta-se que o seu grau de humificação influencia a resistência tênsil de agregados, conforme reportado por Zhang (1994). Isto demonstra que, quanto mais humificada a matéria orgânica do solo, menor será o seu efeito em reduzir a resistência tênsil de agregados.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que:

1. Com a redução do diâmetro de agregados do solo, ocorreu um acréscimo nos valores de RT. Na camada de 0-10 cm, a RT foi maior no SPD para agregados menores que 8 mm, enquanto que, para agregados maiores que 8 mm, os maiores valores de RT ocorrem no solo sob floresta nativa;
2. Os maiores valores de RT, nos tamanhos de agregado menores que 8 mm, no tratamento floresta nativa, estão provavelmente associados com os maiores valores de COS, que está relacionada com o poder cimentante da matéria orgânica, verificada nesse sistema de uso e manejo do solo. Já no SPD, isto se deve ao efeito da densidade de agregados;
3. Independentemente dos maiores valores de RT e  $\rho_{agg}$  e menores teores de COS observados nos solos sob sistema plantio direto, não foi constatado o comprometimento da qualidade física e estrutural do solo.

## CONCLUSÕES GERAIS

1. Os resultados indicaram que, conjuntamente à redução do diâmetro dos agregados, ocorreu um acréscimo nos valores da resistência tênsil de agregados (RT).
2. Os maiores valores de RT no solo sob pastagem intensivamente pastejado, comparado com solo sob plantio direto e floresta nativa, decorrem da maior densidade de agregados resultante do pisoteio animal, bem como de possíveis influências deste sistema de manejo na qualidade da matéria orgânica do solo.
3. Em sistemas de plantio direto, o efeito relativo da posição linha e entrelinha da cultura foi significativo na camada de 0-10 cm, indicado pelos maiores valores de F na posição relativa à linha da cultura. Não foram constatadas diferenças de RT, densidade de agregados e carbono orgânico do solo entre as posições de amostragem, distinguindo-se apenas entre as camadas.
4. No solo sob floresta nativa, os maiores valores de RT com a redução do tamanho dos agregados são condizentes com o maior teor de COS, provavelmente associado ao efeito cimentante da COS.
5. De modo geral, observou-se o decréscimo da  $\rho_{agg}$  no solo sob floresta nativa, quando comparado ao solo sob SPD, bem como os agregados apresentaram maiores teores de COS, diferindo-se do SPD. Os sistemas de manejo modificam a estrutura do solo, manifestados pelas mudanças nas propriedades físicas e mecânicas de agregados.

## LITERATURA CITADA

ALMEIDA, B. G.; DA SILVA, A. P.; RAINE, S. R. & FIGUEIREDO, G. C. Evaluation of Automotive Varnish as a Coating for Density Measurements of Soil Clods. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 449-452, 2009.

ARATANI, R. G.; DA SILVA, O.; CENTURIOM, J. F & ADRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 677-687, 2009.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A. & SILVA A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob floresta nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 337-345, 2004.

ARAÚJO, Q. R.; COSTA, L.M.; JUCKSCH, I.; FONTES, L.E.F. & REGAZZI, A.J. Alterações nas propriedades físicas de um podzólico vermelho-amarelo da região cacauzeira da Bahia, sob diferentes coberturas vegetais. **Agrotropica**, v. 10, p. 69-78, 1998.

BAVOSO, M. A.; GIAROLA, N. F.; TORMENA, C. A. & PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 227-234, 2010.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J. & ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, A. N. & CENTURIOM, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, jul. 2003.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. & SHIPITALO, M. J. Aggregate disintegration and wettability for long-term management systems in the northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 3, p. 759-765, 2007.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M. & IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1472-1481, 2005.

BORGES, A.L.; KIEHL, J.C. & SOUZA, L.S. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um latossolo amarelo álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 1019-1025, 1999.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L. C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 383-391, 1999.

CASSEL, D. K.; NELSON, L. A. Spatial and temporal variability of soil physical properties of norfolk loamy sand as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 5, p. 5-17, 1985.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.28, n.1, p.15-25, 1993.

CHAN, K. Y. Friability of a hardsetting soil under different tillage and land use practices. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.13, n.3, p. 287-298, 1989.

CHAN, K. Y.; DEXTER, A. R. & MCKENZIE, D. C. Categories of soil structure base on mechanical behavior and their evaluation using additions of lime and gypsum on a sodic vertisol. **Australian Journal Soil Research**, Wagga, v. 37, p. 903-911, 1999.

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

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

DERPSCH, R., FRIEDRICH, T., 2009. Development and current status of no-till adoption in the world. In: **Proceedings 18th Conference**, ISTRO, Izmir, Turkey, Paper T1-041, p. 1-16.

DEXTER, A. R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal Agricultural Engineer Research**, Glen Osmond, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A. R. & WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.; MULLINS, C. eds. **Soil and environmental analysis, Physical Methods: Physical methods**, 2. eds. Marcel Dekker Inc., New York, p. 40-430. 2000.

DEXTER, A. R. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. **Catena**, Amsterdam, Supplement.11, p. 35–52.1988.

DEXTER, A. R. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. In: Drescher, J. and Horn, R. (Eds.). **Impact of waters and external forces on soil structure**. Hardcover, **Catena** Supplement 11. Cremlingen-Destedt, v. 2, p. 35-52, 1988.

DEXTER. A. R. Internal structure of tilled soil. **Journal Soil Science**. Glen Osmond, v. 27, p. 267-278, 1976.

DIAS JUNIOR, M. S. & ESTANISLAU, W. T. Grau de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 45-51, 1999.

DONKOR, N. T.; GEDIR, J. V.; HUDSON, R. J. BORK, E. W.; CHANASYK, D. S.; and NAETH, M. A. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. **Canadian Journal Soil Science**, Alberta, v. 82, p. 1–8. 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2<sup>nd</sup>. (Ed.) Rio de Janeiro, p. 212, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2<sup>nd</sup> (Ed.) Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, p. 306, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Londrina, Embrapa-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1984. v.1/2, 791p. (Embrapa-SNLCS. Boletim de Pesquisa, 27; IAPAR. Boletim Técnico, 16).

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C. & NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Brasil, v. 35, p. 437-445, 2011.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA (FEBRAPDP), 2008. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br>. Acesso em 02 de maio de 2011.

FIGUEIREDO, G. C. SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F.; MORAES, S. O. & ALMEIDA, B. G. Improvement of a testing apparatus for dynamometry: procedures for penetrometry and influence of strain rate to

quantify the tensile strength of soil aggregates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Brasil, v. 33, p. 373-387, 2011.

GROSSMAN, R.B & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: physical methods: **Soil Science Society of America**. Madison, v.4, p.201-228, 2002.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. FIDALSKI, J. E. BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Science Agricola**, Piracicaba, v.66, n.4, p.499-505, 2009.

HAJABBASI, M. A.; JALALIAN, A. & KARIMZADEH, H. R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties in Lordegan, Iran. **Plant Soil**, 190:301-308, 1997.

HORN, R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. **Soil Tillage Research**, Amstredan, v. 17, p. 265-289, 1990.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. & DEXTER, A. R. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. E TORMENA, C. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

KASPAR, T. C.; BROWN, H. J. & KASSMEYER, E. M. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.55, p.1390-1394, 1991.

KAY, B. D. & DEXTER, A. R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal Soil Research**, Glen Osmond, v.30, n.3, p.297-310, 1992.

KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. **American Society of Agronomy**, Madison, v. 1, p. 499-506. 1965.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. & DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.51, n.4, p.860-867, 1987.

KLEIN, A. V.; BASSEGIO, M. & MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n.9, p. 2475-2481, 2009.

- LETEY, J. Relations between soil physic properties and crop production. STEWAR, B. A. (ed). **Advances in Soil Science**. New York, v. 1, p. 277-293, 1985.
- LEY, G. J.; MULLINS, C. E. & LAL, R. Effects of soil properties on the strength of weakly structures tropical soils. **Soil Tillage Research**, Amsterdam. 28, p. 1-13, 1993.
- LI, J. T.; ZHONG, X. L.; WANG, F. ZHAO, Q. G. Effect of poultry and livestock manure on soil physical and biological indicators in a rice-wheat rotation system. **Plant Soil Environment**, Nanjing, v. 57, n. 8, p. 351-356. 2011.
- LIMA, C. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. & LEÃO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 945-951, 2004.
- MACHADO, P. L. O. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, Campinas, vol. 28, n. 2, p. 329-334, 2005
- MACKS, S. P.; MURPHY, B. W.; CRESSWELL, H. P. & KOEN, T. B. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. **Australian Journal Soil Research**, New South Wales, v. 34, p. 343-360, 1996.
- MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas em função do revolvimento do solo em plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, 30:163-170, 2006.
- MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A.R. & ALSTON, A. M. Formation of aggregates by plant roots in homogenised soils. **Plant and Soil**. Amsterdam, v.1425, p.69-79, 1992.
- MOHANTY, B. P.; HORTON, R. & ANKENY, M. D. Infiltration and macroporosity under a row crop agricultural field in a glacial till soil. **Soil Science**, Baltimore, v.161, p.205-213. 1996.
- MODOLO, A. J.; SILVA, S. L.; SILVEIRA, J. C. M.; MERCANTE, E. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de precisão em diferentes velocidades. **Engenharia na Agricultura**, Botucatu, v.12, p.56-73, 2004.
- MOSADDEGHI, M. R.; HAJABBASI, M. A. KHADEMI, H. Tensile strength of sand, palygorskite and calcium carbonate mixtures and interpretation with the effective stress theory. **Geoderma**, Isfahan, v. 134, p. 160-170, 2006.

MULLER, M. M.; GUIMARÃES, M. F.; DEJARDINS, T. E. MARTINS, P. F., Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1409-1418, 2001.

MUNKHOLM, L. J. & KAY, B. D. Effect of water regime on aggregate tensile strength, rupture energy and friability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 702-709, 2002.

MUNKHOLM, L.J. & SCHJØNNING, P. Structural vulnerability of a sandy loam exposed to intensive tillage and traffic in wet conditions. **Soil & Tillage Research**, Tjele, v. 70, p. 79-85, 2004.

ONOFIOK, O.E. Spatial and temporal variability of some soil physical properties following tillage of a Nigerian paleustult. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.12, p.285-298, 1988

PENG, X.; HALLETT, P. D.; ZHAN, B. & HORN, R. Physical response of rigid and non-rigid soils to analogues of biological exudates. **European Journal of Soil Science**, Kiel, v. 62, p. 676-684, 2011.

PETEAN L. P.; TORMENA, C. A. & ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1515-1526, 2010.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E. & TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.54, n.3/4, p.145-153, 2000.

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

REIS, E.F.; FERNANDES, H.C.; SHAEFER, C.E.G.R.; ARAÚJO, E.F. Avaliação de mecanismos rompedores e compactadores em semeadura direta. **Engenharia na Agricultura**, Botucatu, v.12, n.3, p.212-21, 2004.

SANCHES, A.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. & RIGOLIN A.T. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 91-99, 1999.

SANCHEZ, P. A. Suelos del trópico - características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura. San José, p 645.1981.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT procedure guide for personal computers.5. Ed. Cary, NC. 2001.

SHANMUGANATHAN, R. T. AND OADES, J. M. Effect of dispersible clay on the physical properties of the b horizon of a red-brown earth. **Australian Journal Soil Research**, Glen Osmond, v.20, p.315-324, 1982.

SILVA, M. S. L. & RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.16, p. 397-402, 1992.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; JUNIOR. M. S. D.; IMHOFF, S.; & KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo.(Ed.) Capítulo VII, p. 242-280, 2010.

SILVA, E. M.; SILVA, T. J.; OLIVEIRA, L. B. MELO, R. F. & JACOMINE P. K. Utilização de cera de abelhas na determinação da densidade do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 955-959, 2003.

SILVA, R. B.; DIAS, M. S.; SILVA, F. A. & FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um latossolo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 973-983, 2003.

SIQUEIRA, R. Milho: semeadoras-adubadoras para sistema plantio direto com qualidade. Disponível em:  
<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb432/Semeadoras/semeadora-adubadora%20para%20sistema%20de%20plantio%20direto%20com%20qualidade.pdf>. 2007. Acesso em 20 de maio de 2011.

SIQUEIRA, R.; CASÃO JUNIOR, R. Trabalhador no cultivo de grãos e oleaginosas: Máquinas para manejo de coberturas e semeadura no sistema de plantio direto. Curitiba: SENAR-PR, p. 88, 2004.

SIX, J. PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; AND COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p. 681-689, 2000.

STARR, J.L., TIMLIN, D.J. Using high-resolution soil moisture data to assess soil water dynamics in the vadose zone. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.3, p.926-935, 2004.

STONE, L. F. & SILVEIRA, P. M. efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 395-401, 2001.

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

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. & SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22 p.301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. & SILVA, A. P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 943-952, 2008 b.

TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & JUNIOR, R. J. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 943-952, 2008 a.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de C orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1023-1031, 2004.

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**, Viçosa v. 22, p. 573-581, 1998.

UTOMO, W. H. & DEXTER, A. R. Soil friability. **Journal Soil Science**, Glen Osmond, v. 32, p. 203-213, 1981.

WATTS, C. W. & DEXTER, A. R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal Soil Science**, Silsoe, v. 49, p. 73-84, 1998.

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.42, n.4, p.253-275, 1997.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. & LONGSTAFF, D. J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part II. Field trials. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, n.2/3, p.175-190, 1996.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, Hafentörn, v. 31, p. 263-275, 1994.