

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E PREPAROS DO SOLO.**

Jean Christian Boukouna

Engenheiro em Mecanização Agropecuária
("Universidad Agraria de la Habana, Cuba")

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre, RS, Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E PREPAROS DO SOLO.**

elaborada por
Jean Christian Boukouna

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Renato Levien, Dr. (Solos-UFRGS)
(Professor Orientador)

Carla T. Chaves Cepik, Dra. (Eng. Agrícola-ULBRA)

Carlos Ricardo Trein, Dr. (Solos-UFRGS)

Paulo César do Nascimento, Dr. (Solos-UFRGS)

Porto Alegre, Novembro de 2009

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo que permitiram e possibilitaram a realização deste trabalho.

À ASAV, pela importante ajuda e apoio moral, especialmente a Karin W. e Aline.

Ao professor orientador Renato Levien pela dedicação, amizade e confiança e pelos valiosos conhecimentos transmitidos e pela compreensão de sempre.

Ao professor Carlos Trein pela amizade e pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Pedro Selbach por ter acreditado em mim desde a primeira vez que conversamos.

Ao professor Neroli Cogo pela grande amizade, confiança, consideração e apoio incondicional. Aos professores Elvio Giasson, Inda Junior e Paulo César, do PPGCS.

Ao senhor Jader Amaro, secretário do PPGCS, pelos conselhos, pelo apoio e pela competência e dedicação de sempre. À senhora Cecília, secretária da Faculdade de Agronomia, a quem incomodei muito, mas nem por isso deixou de me atender.

Aos meus amigos: Augusto N, Freddy C, Sandra, Marília B. (a quem agradeço muito pelo apoio), Tiago G. e família, André, Lito Nunes, Luciane, Nadia, Ana S. Juliana M., Ricardo C.C, Simone Alda e todos aqueles que de alguma maneira me apoiaram.

Aos colegas: Luciléia G, Letícia S, Jeane P, Daniela B., Christina V. e Juliana N. (eternas amigas), Tatiane B., Sergio E., Liane B., Mariana P., Bernardo D., Osmar C., Jonatas M., Michael M., Graziane B., Karina K, Luis de França, Mirla W., Miriam V., Regilene S., Diane, Michele T., Flávio P., Cátia Rommel e Regina F.

Aos funcionários Ozébio e Celso da Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, Adão (Laboratório de Química), Waldir (Laboratório de Física de solo) e Seu Zé.

À Flávia Comiran, meu grande Amor, meu tudo, a quem agradeço pelo sorriso e presença e, sobretudo, pelo carinho e amor incondicionais e pelo apoio em todo sentido.

A mim mesmo por reconhecer a todos e aqueles que de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, e por não ver os problemas como problemas e também por acreditar em meus sonhos com muita tranquilidade e paciência.

Aos meus irmãos com quem cresci e me construí como pessoa através da interação que tive com eles. Aprendi muito com os riscos e desafios que as situações que vivemos juntos me impunham. Hoje sou capaz de ter amizades mais profundas e amorosas porque a riqueza dessas relações me preenche.

Aos meus pais, pela educação e por me permitirem de ver a vida de uma forma simples.

**Aos meus amores e a todos os seres
queridos e especiais da minha família**

(in memoriam)

À família Melgarejo Jácome (Equador)

À família Comiran

**À família Boukounga e à família
Watinou,**

Dedico este trabalho.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- φ - Ângulo de atrito interno.
 μ - Coeficiente de atrito.
 τ - Tensão de cisalhamento.
 σ - Tensão normal efetiva.
U_v - Umidade volumétrica do solo.
U_g - Umidade gravimétrica.
 σ_p - Pressão de pré-consolidação.
A - Área de contato pneu-solo.
b - Base maior
c - Coesão do solo.
IC - Coeficiente de compressibilidade do solo.
D_p - Densidade de partículas
D_s - Densidade do solo.
D_{smax} - Densidade máxima do solo
DR - Densidade Relativa do solo
D_t - Diâmetro total do pneu
E_c - Energia de compactação
PD - Plantio Direto
PR - Preparo Reduzido
PC - Preparo Convencional
F - Tensão máxima de cisalhamento ou potencial de tração.
F_f - Força tangencial a superfície de atrito.
G_s - Grau de saturação
h - Base menor
L - Altura de queda do soquete
M_{ss} - Massa de solo seco em estufa a 105°
N - Força normal, perpendicular à superfície.
N - Número de camadas
RP - Resistência mecânica do solo à penetração
MOS - Matéria orgânica do solo

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E PREPAROS DO SOLO¹

Autor: Jean Christian Boukounga

Orientador: Prof. Renato Levien

RESUMO

Os solos sob uso agrícola, dependendo do manejo a que estão submetidos, sofrem degradação ou recuperação da sua estrutura, uma vez que fatores de natureza física, química e biológica interagem de forma contínua. Os efeitos do tráfego de máquinas nos atributos do solo, de acordo com o tempo de uso, são ainda pouco pesquisados em ambientes tropicais, e muitas dúvidas existem sobre a variação dinâmica da estrutura do solo e sua interação com máquinas e animais. Esta pesquisa conduzida na Estação Experimental Agronômica da UFRGS objetivou avaliar a compactação de um Argissolo Vermelho Distrófico típico, a partir da pressão de pré-consolidação obtida das curvas de compressão, afetada por diferentes sistemas de manejo do solo (adubação mineral (AM) e orgânica (AO), irrigação (I), rotação (R) e sucessão (S) culturais) e de preparos de solo (preparo convencional (PC), plantio direto (PD), preparo reduzido (PR)), bem como área testemunha de campo nativo (CN).

Para cumprir com os objetivos foram realizados dois estudos. O primeiro envolveu o ensaio de compressibilidade, sendo as amostras indeformadas coletadas em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm) e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com aplicação sucessiva e contínua de pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 600 e 800 kPa. O segundo estudo envolveu o ensaio de Proctor Normal para determinar as curvas de compactação e cálculo dos valores de densidade máxima, umidade do solo para obtenção da máxima compactação e densidade relativa. Os sistemas de manejo e de preparo alteraram o comportamento compressivo do solo em ambas as profundidades. A pressão de pré-consolidação no PD foi significativamente maior em ambas as profundidades, aproximando-se aos valores obtidos no CN. Pelo teste de Proctor notou-se que os sistemas de manejo e preparos do solo influenciaram as densidades e umidades máximas de compactação.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (89 p.) Novembro, 2009.

A PALEUDULT PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN DIFFERENT LAND MANAGEMENT SYSTEMS¹

Author: Jean Christian Boukouna

Advisor: Prof. Renato Levien

SUMMARY

Soil structure may be degraded or restored through management. For any particular land use system, the soil aggregation status depends on the continuous interaction among physical, chemical and biological factors. The effects of machinery traffic on soil attributes following the adoption of no-till system in tropical environments are still poorly documented. Numerous questions persist about the dynamic variation of soil structure and its interaction with machinery and animals. This work carried out in the “Estação Experimental Agronômica da UFRGS” had the objective to evaluate the Paleudult compaction, through the preconsolidation pressure, modified by different land management systems. This study was carried out under conventional tillage (PC), no-tillage (PD), reduced tillage (PR) and under native forest (CN). For the accomplishment of the work objective, two studies were carried out. The first consisted in compressibility test, where undisturbed soil samples were collected at two depths (0-10 and 10-20 cm). The soil samples were weighted and submitted to uniaxial compression test, applying successively pressures of: 25, 50, 100, 200, 400, 600 and 800 kPa. The second study consisted in Proctor test, so 29 soil samples of 25 kg each one were collected in order to determine the soil compaction degree. In this chapter, was determined a maximum soil bulk density, maximum soil water content of compaction also the soil penetration resistance in different soil water content. Different soil tillage changed the compressive soil behaviour at both depths and the no-tillage preconsolidation pressure was higher at the two depths, approaching native forest values. With Proctor test, we noticed that the soil tillage system influenced on the bulk density and water content of compaction, mainly on Relative Density.

¹ M.Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (89 p.) November, 2009.

SUMÁRIO

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. HIPÓTESES DO TRABALHO	4
2.1. OBJETIVOS GERAIS	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. ESTRUTURA DO SOLO	6
3.1.1. Solo.....	6
3.1.2. Relação Solo-Máquina	6
3.1.3. Matéria orgânica do solo	8
3.1.4. Sistemas de preparo do solo.....	10
3.1.5. Escarificação do solo.....	13
3.1.6. Adubação do solo	14
3.1.7. Processos de compactação do solo.....	15
3.1.8. Resistência mecânica do solo à penetração	17
4. Estudo I: ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAxIAL COM DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE (PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO) E SUSCETIBILIDADE DO SOLO À COMPACTAÇÃO	20
4.1. INTRODUÇÃO	20
4.1.1. Compressibilidade do solo.....	20
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.2.1. Solo.....	26
4.2.2. Histórico da área de estudo.....	26
4.2.3. Tratamentos	28
4.2.4. Máquinas e implementos agrícolas	30
4.2.5. Avaliações.....	30
4.2.6. Obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (MCSCS).....	34
4.3. ANÁLISES LABORATORIAIS	35
4.3.1. Teor de água no solo	35
4.3.2. Densidade do solo	36
4.3.3. Matéria orgânica do solo (MOS)	36
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	37
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.5.1. Compressibilidade do solo.....	37
4.5.2. Densidade do solo	39
4.5.3. Pressão de pré-consolidação	42
4.5.4. Índice de compressibilidade do solo	47
4.5.5. Índice de relaxamento (IR)	50
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5. Estudo II: COMPACTAÇÃO MÁXIMA E RELATIVA DO SOLO COM O ENSAIO DE PROCTOR	56
5.1. INTRODUÇÃO	56
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
5.2.1. Ensaio de Proctor	59
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.4. CONCLUSÃO.....	76

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

RELAÇÃO DE TABELAS

1. Quantidades de cama de aviário, equivalente em corretivo de acidez, nutrientes e metais pesados, adicionados nos tratamentos com adubação orgânica, nos sistemas de manejo de solo e de culturas (sucessão e rotação)..... 27
2. Quantidades de materiais e nutrientes adicionadas nos tratamentos com adubação mineral nos sistemas de manejo do solo e de culturas (sucessão e rotação)..... 28
3. Densidade do solo (D_s), teor de água inicial no solo (TAI), umidade volumétrica inicial (U_{vi}), índice de vazios (e), grau de saturação inicial (G_{si}), pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC), índice de relaxamento (IR) e matéria orgânica (MO) de um Argissolo Vermelho Distrófico típico..... 38
4. Valores da densidade nos diferentes manejos. 41
5. Efeitos dos sistemas de preparos sobre a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) em duas profundidades (cm). 42
6. Efeitos dos sistemas de preparos sobre a pressão de pré-consolidação (kPa) nas duas profundidades (cm). 43
7. Efeitos dos sistemas de preparo do solo sobre o índice de compressibilidade do solo (IC). 48
8. Efeitos dos sistemas de preparo do solo e profundidade de amostragem sobre Índice de relaxamento do solo (IR). 50
9. Efeitos dos manejos sobre os atributos físicos D_s (densidade do solo), MO (matéria orgânica), IC (índice de compressibilidade), IR (índice de relaxamento) e σ_p (pressão de pré-consolidação), nas camadas de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm..... 52
10. Efeito dos diferentes preparos e manejos sobre IC (índice de compressibilidade) e σ_p (pressão de pré-consolidação), em diferentes profundidades..... 54
11. Efeito dos diferentes manejos do solo, nas profundidades de amostragem, sobre IC (índice de compressibilidade do solo)..... 54
12. Densidade do solo na condição de campo (D_s), umidade ótima para compactação (UOC), densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e densidade relativa (DR) em diferentes sistemas de manejos e preparos de um Argissolo Vermelho Distrófico típico..... 64
13. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e de densidade relativa (DR) na profundidade de 0 a 20 cm, considerando as formas de adubação mineral e orgânica, independentemente dos métodos de preparo e de manejos do solo.66
14. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e de densidade relativa (DR) dos blocos sob sistema de manejo rotação de culturas, na profundidade de 0 a 20 cm, independentemente dos métodos de preparo do solo..... 66

- 15.** Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e de densidade relativa (DR) dos blocos sob sistema de manejo sucessão de culturas, na profundidade de 0 a 20 cm, independentemente dos métodos de preparo do solo. 67
- 16.** Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e de densidade relativa (DR) dos métodos de preparo do solo, com e sem uso de irrigação, na profundidade de 0 a 20 cm, independentemente do sistema de manejos das culturas. .. 67
- 17.** Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e de densidade relativa (DR), na profundidade de 0 a 20 cm, dos blocos com irrigação e sem irrigação. 67

LISTA DE FIGURAS

1. Parâmetros que interferem no processo de compactação do solo e capacidade de suporte do solo após a passagem de uma máquina (Diserens, 2004). 8
2. Curva característica de compressibilidade de um solo submetido a pressões crescentes (Lebert & Horn, 1991), onde d_1 e d_2 = densidade mínima e máxima; C_r = curva de recompressão; σ_p = pressão crítica; C_c = índice de compressão e C_v = reta virgem..... 21
3. Relação entre o aumento do teor de umidade e a variação da densidade do solo submetido a um nível de energia (Mantovani et al., 1992). 23
4. Croqui da área experimental. 29
5. Trincheira aberta e anéis usados para a coleta das amostras indeformadas para o ensaio de compressibilidade do solo. 31
6. Determinação da compressibilidade do solo utilizando a prensa oedométrica. **(A)** Amostra no anel volumétrico antes de ser colocada na prensa; **(B)** Prensa oedométrica uniaxial; **(C)** Retirada da amostra da prensa; **(D)** Amostra prensada. 32
7. Curva de compressão do solo que ilustra a metodologia de Pacheco Silva para a determinação da tensão de pré-consolidação (σ_p). 34
8. Pressão de pré-consolidação como função da umidade volumétrica do solo nos sistemas de preparo do solo nas profundidades de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b). .. 44
9. Pressão de pré-consolidação como função da densidade do solo nos sistemas de preparo do solo na profundidade de 0 a 10 cm(a) e de 10 a 20 cm (b). 45
10. Pressão de pré-consolidação como função do grau de saturação do solo nos sistemas de preparo na profundidade de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b). 47
11. Índice de compressibilidade (IC) como função do grau de saturação do solo para sistemas de preparo na profundidade de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b). 49
12. Índice de relaxamento (IR) como função do grau de saturação do solo nos quatro sistemas de preparo na profundidade de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b). 51
13. Ilustração de algumas etapas do ensaio Proctor Normal: (A) Pesagem da quantidade de solo necessária para cada teste; (B) Mistura homogênea do solo com água para obtenção do teor de água estipulado para a curva de compactação. (C) Adição do solo no cilindro, em camadas; (D) Aplicação dos 25 golpes sobre o corpo de prova; (E) Pesagem do cilindro + solo úmido. 60
14. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco I, com adubação mineral (AM), irrigado (I), com rotação de culturas (R), na camada de 0-20 cm de profundidade. 69

- 15.** Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco II, com adubação mineral (AM), irrigado (I), com sucessão de culturas (S), na camada de 0-20 cm de profundidade..... 69
- 16.** Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco III, com adubação mineral (AM) e pousio no inverno (P), na camada de 0-20 cm de profundidade..... 70
- 17.** Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco IV, com adubação orgânica (AO) com sucessão de culturas (S), na camada de 0-20 cm de profundidade. 70
- 18.** Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco V, com adubação mineral (AM) com rotação de culturas (R), na camada de 0-20 cm de profundidade. 71
- 19.** Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco VI, com adubação mineral (AM) com sucessão de culturas (S), na camada de 0-20 cm de profundidade..... 71
- 20.** Curvas de compactação do solo nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco VIII, com adubação orgânica (AO) e rotação de culturas (R), na camada de 0-20 cm de profundidade..... 72
- 21.** Curvas de compactação no Bloco VII, área do campo nativo (CN), na camada de 0-20 cm de profundidade..... 72
- 22.** Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 – 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco II, com adubação mineral (AM), irrigado (I) e com sucessão de culturas (S)... 73
- 23.** Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco III com adubação mineral (AM) e Pousio (P). 74
- 24.** Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco V com adubação mineral (AM) e com rotação de culturas (R)..... 74
- 25.** Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 – 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco VI, com adubação mineral (AM) e com sucessão de culturas (S)..... 75
- 26.** Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco VIII, com adubação orgânica (AO), rotação de culturas (S)..... 75

1. INTRODUÇÃO GERAL

A complexidade do solo está na dinâmica com que os fatores físicos, químicos e biológicos interagem contínua e simultaneamente. É nessa visão que se torna necessária uma compreensão mais adequada da estruturação e degradação do solo, pois as características dinâmicas do mesmo interferem diretamente na produtividade das culturas, por atuarem na disposição das unidades estruturais e na variação do espaço poroso. A condição física de um solo pode deteriorar, como resultado de várias causas. Sob uso agrícola, a utilização intensiva da terra, com sistemas de cultivos inadequados, tem contribuído para a degradação das características físicas, químicas e biológicas do solo, onde a destruição dos agregados naturais e das unidades estruturais é ressaltada como consequência da diminuição da matéria orgânica e da compactação pelo tráfego.

Diante desses aspectos, a formação e estabilidade dos agregados recebem maior atenção por parte dos pesquisadores. Nota-se então a importância de distinguir os fatores que influem na agregação do solo e aqueles que condicionam sua estabilidade.

A estrutura original do solo apresenta características definidas pelo material de origem, processos pedogenéticos, vegetação, posição na paisagem e clima. Nos horizontes superficiais dos solos agrícolas, ela está sujeita a alterações pela ação de fatores externos, principalmente pelos sistemas de preparo de solos e a forma e quantidade das operações mecanizadas. Assim, os sistemas de manejo modificam as condições originais de um solo, estabelecendo um novo tipo, classe e grau de estrutura, que pode ser adequada ou não ao desenvolvimento das plantas.

Nas últimas décadas, houve um aumento do uso do solo e da mecanização, com conseqüente degradação da estrutura original, evidenciada pela redução da macroporosidade, aumento da densidade e da resistência do solo ao desenvolvimento das raízes. Por isso, métodos de preparo de solo como o reduzido e o plantio direto, vêm sendo adotados em substituição aos preparos convencionais. Tais métodos, por não revolverem o solo ou revolvê-lo parcialmente, podem

produzir no perfil estruturas diferentes daquelas resultantes dos preparos convencionais.

Os danos à estrutura do solo, causados pelo excesso de mobilização, foram praticamente eliminados no sistema plantio direto, onde esta só ocorre na linha de semeadura. Entretanto, a eliminação do revolvimento permite um acúmulo de pressões produzidas pelo tráfego das máquinas agrícolas e animais, que podem resultar em compactação superficial e/ou subsuperficial. Essa compactação pode atingir níveis prejudiciais ao desenvolvimento das plantas e à produção das culturas (Silva, 2003; Streck, 2003; Secco, 2003).

Os tratores agrícolas são dotados de pneus e seu deslocamento, em trabalho, sobre solo não consolidado causa patinagem, a qual aumenta potencialmente com a umidade, propiciando assim uma maior compactação. O solo, em condições favoráveis ao tráfego, apresenta resistência às pressões aplicadas pelos pneus, sem exceder o limite elástico e sem deformar-se permanentemente. A extensão dessas deformações depende das características físicas do solo e da pressão que os pneus exercem sobre o solo.

Para compreender as causas e os efeitos do uso do solo sobre sua estrutura, foram analisados sistemas de manejo que envolvem diferentes preparos. Dentro deste enfoque, a utilização da mecanização agrícola deve ser adaptada para não destruir as boas condições físico-químico-biológicas do solo, ou seja, a tensão exercida pelas máquinas sobre o solo deve ser adequada à resistência à deformação do mesmo. Estas informações são obtidas pelo teste de compressibilidade ou compressão uniaxial do solo, que envolve o estudo da relação entre a tensão imposta ao solo por forças externas e a deformação do mesmo, representada pela pressão de pré-consolidação (σ_p).

Vários estudos têm demonstrado a necessidade de reduzir o tráfego com máquinas sobre as áreas de cultivo. A adoção do sistema plantio direto foi um avanço, porém com o passar do tempo começam a ocorrer problemas relacionados ao comportamento estrutural do solo, como a redução do espaço poroso, o que afeta a movimentação da água e gases no seu interior.

Vários parâmetros físicos e mecânicos do solo são utilizados para o controle e mensuração da compactação, tal como a análise da planta, seu desenvolvimento radicular e aéreo e o rendimento. O estudo para o estabelecimento dos valores ou faixas limites dos parâmetros do solo que sejam críticos ao desenvolvimento das

plantas é uma tarefa complexa, sobretudo quando se considera que, segundo Hakansson & Lipiec (2000), a resposta das culturas a estes varia de um solo para outro. Também se buscam parâmetros que sejam representativos da compactação do solo e possibilitem uma comparação entre os mais diferentes solos e manejos, como o “grau de compactação”. Os estudos sobre a compactação do solo são muitos, bem como são muitos os meios para diminuir esse problema.

Este trabalho teve por objetivo determinar a capacidade de suporte (pressão de pré-consolidação) e o índice de compressibilidade do solo em diferentes sistemas de preparo, obtidos a partir das curvas de compressão, assim como determinar o grau de compactação do solo.

2. HIPÓTESES DO TRABALHO

1. As cargas aplicadas ao solo, nos diferentes sistemas de manejo com preparo do solo (plantio direto (PD), preparo reduzido (PR) e preparo convencional (PC)), determinam diferenciados graus de compactação do solo e apresentam distintas pressões de pré-consolidação.

2. Os solos sob plantio direto possuem maior capacidade de suporte de carga e são menos susceptíveis à compactação.

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Determinar o estado de compactação em diferentes sistemas de preparo, com ênfase na compressibilidade.

Estudar algumas propriedades físicas associadas à compactação e parâmetros físico-mecânicos do Argissolo Vermelho Distrófico típico submetido a diferentes sistemas de manejo e de preparos de solo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar a pressão de pré-consolidação (σ_p) do solo e sua suscetibilidade à compactação (IC) em diferentes sistemas de preparo e profundidades, bem como o grau de compactação atual.

Analisar a porosidade (índice dos vazios) do solo e sua densidade nos diferentes sistemas de preparo ou manejo.

Determinar a densidade máxima do solo submetendo amostras ao teste de Proctor Normal, bem como calcular a densidade relativa.

Para alcançar os objetivos, foram realizados dois estudos: estudo I, no ensaio de compressão uniaxial, no qual se discutiu a capacidade de suporte (pressão de pré-consolidação), assim como a suscetibilidade do solo à compactação (índice de compressibilidade), observando as alterações da densidade do solo e obtendo a curva característica de compressão do solo. O estudo II é dedicado ao teste de Proctor Normal

para determinar a compactação máxima do solo (densidade máxima do solo em diferentes teores de umidade) e densidade relativa do solo nas amostras submetidas ao referido teste.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ESTRUTURA DO SOLO

O conhecimento de aspectos básicos relacionados à estrutura do solo é recomendado para qualquer operação ligada à qualidade física do solo, definida por Dexter (1988) como sendo a forma pela qual os diversos componentes do solo, e consequentemente, suas propriedades, se arranjam no espaço.

Uma estrutura do solo adequada às plantas é aquela que, além de ser estável, garante a existência de poros para o armazenamento de água disponível às plantas, para a infiltração e transmissão de água e para a aeração, e que não exista resistência ao crescimento das raízes (Oades, 1984). Segundo Dexter (1988), a estrutura ideal deve possuir 10% dos poros com diâmetro maior que 30 μm para a aeração e infiltração rápida de água, bem como haja um máximo de volume de poros entre 30 e 0,2 μm de diâmetro para armazenamento de água disponível às plantas. O autor salienta também que um solo bem agregado diminui as perdas de solo, água, nutrientes e moléculas de agrotóxicos por processos erosivos e, ainda, facilita as operações de preparo do solo.

3.1.1. Solo

A capacidade de suporte ou estabilidade estrutural do solo, chamada também no ensaio oedométrico de ponto de pré-consolidação, corresponde à carga limite suportável pelo solo, sem que este se deforme irreversivelmente (Lebert, 1989). Três parâmetros fundamentais determinam esta capacidade para uma determinada profundidade: o volume dos macroporos ligado à granulometria do solo, o potencial hídrico e a configuração estrutural dos agregados da área nesta profundidade dada. Estes parâmetros, por sua vez, são relacionados com ao tipo do solo, clima e sistema de manejo das culturas adotado pelo agricultor.

3.1.2. Relação Solo-Máquina

Na agricultura, infelizmente há atividades como a aplicação de agroquímicos no combate de pragas e doenças ou a colheita, em que nem sempre é possível realizá-las

quando o solo apresenta um teor de água que permita o tráfego de maquinarias. O desenvolvimento de máquinas com um menor potencial para a compactação do solo é uma alternativa para reduzir os danos da compactação (Braidá, 2004).

Os veículos que trafegam sobre uma área cultivada são um dos principais agentes de compactação dos solos agrícolas. O tipo de pneu, suas dimensões, velocidade de deslocamento, número de vezes que trafega sobre o mesmo local e carga suportada, são fatores que provocam maior ou menor compactação do solo (Mazeiro et al., 1997).

Embora as máquinas tenham aumentado consideravelmente de peso, a área de contato pneu-solo não aumentou na mesma proporção, o que provoca um aumento da pressão de contato, transmitindo maiores tensões para o solo. A busca de um desempenho em operações agrícolas justifica-se pela variedade de utilização das máquinas agrícolas, devendo-se considerar, portanto, os tipos de pneus e pressões de inflação adequadas, pois pressões inadequadas (aquelas que não coincidem com a recomendada pelo fabricante, sobretudo as superiores a esta) aumentam a probabilidade de ocorrência da compactação do solo, explicação resumida na Figura 1.

Larguras de pneus diferentes, com carregamentos semelhantes, proporcionam transmissão de energias diferenciada ao solo em profundidade. Um pneu mais largo transmite uma pressão distribuída na superfície, enquanto que os pneus estreitos transmitem a pressão em profundidades maiores. Na agricultura são utilizados pneus diagonais e radiais, com um aumento na utilização de pneus de baixa pressão e alta flutuação. Sua diferença manifesta-se na forma de confecção da banda de rodagem.

As marcas deixadas pelas rodas da máquina atestam, por si só, uma deformação do solo. Esta deformação resulta de dois fenômenos: a compressão (quando o solo perde seu volume) e o cisalhamento (quando o solo se deforma ou se desloca sem perder seu volume). Suas respectivas medidas, obtidas em células oedométricas e em caixa de cisalhamento, permitem avaliar a estabilidade estrutural do solo.

Na Figura 1 constam os parâmetros a serem levados em consideração para avaliar as condições de tráfego em uma lavoura.

O aumento da velocidade de deslocamento dos rodados durante o tráfego, ao reduzir o tempo de permanência da carga sobre o solo, diminui o grau de compactação (Chamen et al., 2003), bem como a magnitude das tensões transmitidas às camadas subsuperficiais (Alakukku et al., 2003).

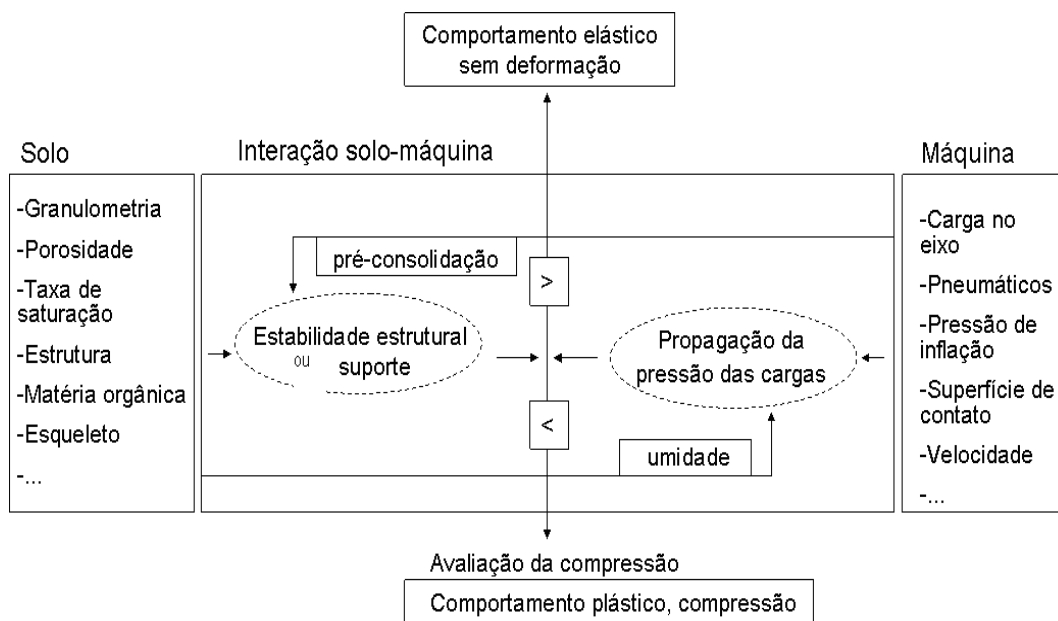


FIGURA 1. Parâmetros que interferem no processo de compactação do solo e capacidade de suporte do solo após a passagem de uma máquina (Diserens, 2004).

Resumindo a importante informação que traz a Figura 1, vale salientar que em superfície, os riscos de compactação estão diretamente ligados à pressão de contato, esta pressão depende da carga, da pressão de inflação, da dimensão, do tipo de pneu e da plasticidade do solo. Em profundidade, em compensação, a carga no eixo e a estabilidade do solo são determinantes na avaliação dos riscos.

A avaliação dos riscos baseia-se em primeiro lugar sobre dois valores, a estabilidade estrutural ou ponto de pré-consolidação (suporte) e a propagação de carga. Se o ponto de pré-consolidação for inferior à carga, o risco de compactação é maior. O conhecimento destes dados permitirá localizar os riscos ligados tanto ao solo como às cargas. Esta é a avaliação chave dos riscos, que o agricultor deve usar.

3.1.3. Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo tem efeito determinante na formação e estabilização de agregados do solo (Tisdall & Oades, 1982; Oades, 1984). Segundo Baumgartl & Horn (1991) e Horn et al. (1993), a resistência do solo tende a aumentar com o desenvolvimento de estrutura, e quanto mais agregado é o solo, menor a atenuação da carga aplicada.

D'Agostini (1992) argumenta que solos recuperados por processos biológicos, em que as condições estruturais se aproximam das naturais, tendem a apresentar

condições de alta compressibilidade, uma vez que a agregação é acompanhada de um aumento da porosidade, em especial da macroporosidade. O solo que apresenta uma alta macroporosidade é mais compressível, porque apresenta menor número de pontos de contato partícula-partícula para conferir resistência mecânica à pressão compressiva imposta a ele (Macedo, 1993).

A matéria orgânica do solo tem grande influência no comportamento físico do solo, inclusive quando o mesmo é submetido a tráfego. Ela diminui a densidade e o grau de compactação; por outro lado, aumenta a porosidade e, em algum grau, o espaço aéreo do solo quando submetido à compactação pelo tráfego de máquinas agrícolas (Arvidsson, 1998).

A matéria orgânica do solo pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang et al., 1997). A resistência à compressão diminui quando predominam os efeitos da redução da densidade. Entretanto, a matéria orgânica produz aumento da resistência do solo à compressão, quando predomina o efeito de aumento dos parâmetros de cisalhamento, aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente e redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas, redução da densidade por efeito de diluição e aumento da elasticidade.

Essa aparente contradição é decorrente do fato da matéria orgânica estar associada a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo: 1 - aumenta a força de ligação entre as partículas minerais e, 2- mudança no arranjo das partículas (porosidade) (Zhang, 1994; Horn & Lebert, 1994; Ekwue 1995). O balanço entre os dois efeitos, que depende da origem, estado de decomposição, status químico da matéria orgânica, é que vai determinar o efeito sobre a resistência do solo à compressão.

A matéria orgânica do solo pode interferir na resistência do solo à compactação mediante os seguintes efeitos: 1- aumento da força de ligação entre partículas minerais, em função de sua natureza coloidal e comportamento molecular; 2- aumento da elasticidade do solo, uma vez que materiais orgânicos podem apresentar altos índices de relaxação quando uma carga aplicada sobre eles é retirada e, quando adicionados ao solo, conferem a ele essa propriedade; 3- diluição da densidade, já que a densidade dos materiais orgânicos é consideravelmente menor que a das partículas minerais do solo. Logo, a adição desses materiais ao solo resulta em uma mescla de menor densidade; 4- filamentos, como hifas de fungos e raízes, entrelaçam partículas do solo, mantendo-as

juntas; 5- algumas substâncias orgânicas, ao recobrir partículas de argila, podem mudar sua carga elétrica e facilitar o fluxo de água entre elas; 6- substâncias orgânicas, ao reterem fortemente a água, podem aumentar a fricção entre as partículas minerais (Soane, 1990).

Este mesmo autor supracitado, afirma que o material orgânico possui uma elasticidade muito maior que as partículas do solo. A matéria orgânica do solo (MOS) é uma das responsáveis pela sua boa estrutura, uma estrutura com resistência suficiente para suportar o tráfego sem apresentar compressibilidade significativa (Chaney et al., 1985). A MOS permite ao solo formar agregados mais densos e resistentes e que estão mais próximos entre si. Como consequência, para um mesmo nível de tráfego, este autor observou que a produção foi maior nos solos com maiores teores de matéria orgânica.

O sistema plantio direto permite um acúmulo de material orgânico sobre e na camada superficial do solo, reduzindo a compactação ou os seus efeitos. O acúmulo de material orgânico está relacionado à inexistência de revolvimento do solo pois, assim, esse material não é misturado ao solo e sua decomposição é mais lenta e, ainda, há menores perdas por erosão.

Mosaddeghi et al. (2000) observou que a adição de esterco ao solo reduziu o efeito do tráfego e da umidade sobre a densidade e o índice de cone, aumentou o intervalo de umidade que o solo suporta pelo tráfego de máquinas, podendo, assim, reduzir a compactação do mesmo.

3.1.4. Sistemas de preparo do solo

O preparo do solo é uma prática que atua diretamente sobre sua estrutura que, por sua vez, afeta uma série de características, modificando as variáveis ligadas a ela (Vieira, 1985).

O tipo de preparo do solo condiciona o grau de incorporação dos resíduos vegetais, a degradação da matéria orgânica (Etana et al., 1999) e pode afetar a eficiência das fontes orgânicas e minerais de nutrientes. O tipo de manejo do solo conduz à degradação ou a recuperação de sua estrutura, pois os fatores químicos, físicos e biológicos estão continuamente interagindo (Silva & Mielniczuk, 1997). Os sistemas de preparo, por sua vez, afetam as características químicas, físicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, os processos de erosão, disponibilidade de nutrientes e estruturação do solo. A intensidade de revolvimento do solo e a manutenção, ou não, dos resíduos de

colheita na lavoura, podem interferir na mineralização da fonte orgânica aplicada e na perda de nutrientes por erosão, principalmente. Por outro lado, sistemas de preparo, que resultam na degradação dos solos, podem ter os efeitos negativos minimizados com a aplicação de fontes orgânicas de nutrientes (Veiga et al., 1998).

Neste trabalho são estudados três diferentes sistemas de preparo do solo: o plantio direto, o preparo reduzido e o preparo convencional.

O preparo convencional se caracteriza pelo revolvimento excessivo do solo causado pelo uso intensivo de arados e grades, associado a outras práticas de cultivo, levando a pulverização da camada arável e a compactação da camada superficial, fatores que podem causar a erosão do solo, perda de fertilidade do solo ou baixo teor de matéria orgânica do solo.

Cada sistema de manejo do solo altera de forma diferenciada as suas propriedades. O preparo reduzido, com escarificação, desagrega o solo no sentido ascendente, mantendo grande parte da cobertura vegetal sobre ele. Por meio das fendas originadas pela ação do escarificador, pode promover a incorporação dos fertilizantes aplicados na superfície em maiores profundidades, quando comparado ao plantio direto. Também, por aumentar a macroporosidade em relação ao plantio direto, pode facilitar a lixiviação dos nutrientes de maior mobilidade no perfil do solo. O preparo reduzido é um preparo intermédio entre o convencional e o plantio direto, assim como diz o nome no preparo reduzido, o uso de máquinas agrícolas é mínimo.

A escarificação promove melhorias sobre as propriedades físicas do solo e, em alguns casos, aumento da produtividade das culturas (Secco, 2003). Em geral essas melhorias persistem por um período efêmero, correspondente a aproximadamente uma safra (Corsini & Ferraud, 1999; Botta et al., 2006) ou a um ano (Secco & Reinert, 1997; Tavares-Filho et al., 2006). Conforme os mesmos autores, a escarificação torna o solo mais vulnerável à deformação pelo tráfego de máquinas agrícolas.

O plantio direto é um sistema de preparo do solo onde a palha e os restos vegetais são deixados na superfície do solo. O solo é revolvido apenas no sulco onde são depositados sementes e fertilizantes. Não existe preparo do solo além da mobilização no sulco de plantio. Considera-se que, para o sucesso do sistema, são fundamentais a rotação de culturas e o manejo integrado de pragas, doenças e plantas invasoras. O plantio direto está sendo adotado como uma alternativa de manejo correto e sustentável de sistemas agrícolas intensivos. No plantio direto, geralmente, o solo apresenta maiores valores de densidade do solo e de microporosidade, e menores

valores de macroporosidade e porosidade total, nas camadas superficiais do perfil, em comparação com solos em que é empregado o preparo convencional. Isto acontece, principalmente, pela ausência de revolvimento do solo e da movimentação de máquinas e implementos agrícolas, sobretudo quando realizada em solos com teores elevados de argila (Vieira, 1981; Vieira & Muzilli, 1984; Corrêa, 1985). Com o passar dos anos, a densidade do solo pode diminuir, devido, em parte, ao aumento do conteúdo de matéria orgânica na camada superficial, favorecendo a melhoria da estrutura (Fernandes et al., 1983; Reeves, 1995).

O sistema plantio direto permite, então, um acúmulo de matéria orgânica no solo em relação ao sistema convencional. Esse efeito pode se contrapor à compactação do solo, reduzindo-a ou reduzindo seus efeitos, por aumentar o intervalo de umidade em que o solo pode ser trafegado, aumentar a resistência do solo à deformação e por diminuir a resistência à penetração das raízes quando o solo está seco (Soane, 1990; Ekwe, 1990; Zhang, 1994; Arvidsson, 1998; Mosaddeghi et al., 2000).

Muitos trabalhos têm evidenciado que o conteúdo de água do solo é maior em plantio direto em relação às áreas cultivadas com preparo convencional (Lal, 1974; Vieira, 1981; Sidiras et al., 1983; Salton & Mielniczuk, 1995).

As características físico-hídricas do solo, alteradas pelo preparo, influenciam o crescimento das raízes. O sistema de plantio direto, além de enriquecer o solo com matéria orgânica, permite o acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do mesmo. A baixa densidade desses resíduos orgânicos, associada com sua suscetibilidade à deformação e elasticidade, torna-os capazes de atenuar as cargas aplicadas sobre o solo. Essa possibilidade foi confirmada por Dão (1996), ao observar que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo resultou em aumentos na densidade do solo, especialmente na camada entre 0,05 e 0,12 m de profundidade, no sistema de cultivo convencional e entre 0,00 e 0,05 m no plantio direto.

O material vegetal adicionado superficialmente decompõe mais lentamente quando não é incorporado ao solo, porque fica menos exposto ao contato com os microorganismos do solo. A matéria orgânica do solo também fica menos exposta ao ataque dos microorganismos, pois sem o revolvimento, não há quebra das estruturas que a protegem fisicamente dos agentes decompositores.

Assim, vários autores têm registrado aumentos nos teores de matéria orgânica da camada superficial de solos sob plantio direto (Machado & Brum, 1978; Centurion et al., 1985; Merten & Mielniczuk, 1991; Ismail et al., 1994; Bayer & Mielniczuk, 1997;

Corazza et al., 1999; Amado et al., 2001). A quantidade de material vegetal adicionado na superfície e a quantidade de matéria orgânica acumulada no solo são dependentes do sistema de culturas adotado (Bayer et al., 2000; Amado et al., 2001). Aqueles sistemas que incluem culturas com alta produção de matéria seca e com baixa relação C/N, em geral, resultam em maiores acúmulos de matéria orgânica no solo.

Os maiores teores de matéria orgânica, observados em solos sob plantio direto, estão, geralmente, associados a aumento na estabilidade dos agregados (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Paladini & Mielniczuk, 1991; Campos et al., 1995), do armazenamento de água (Sidiras et al., 1984; Centurion & Demattê, 1985), e da CTC do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997), com reflexos na produção das culturas (Arvidsson, 1998). Entretanto, ainda são poucos os relatos na literatura dos efeitos do acúmulo de matéria orgânica sobre as propriedades mecânicas do solo.

3.1.5. Escarificação do solo

A eficiência da escarificação em romper camadas compactadas de forma imediata tem sido inferida por diversos trabalhos de pesquisa. Esses trabalhos mostram que a escarificação diminui a resistência mecânica do solo à penetração (Pikul Junior & AASE, 1999; Levien, 1999; Furlani, 2000; Hamilton-Manns et al., 2002; Secco, 2003; Abreu et al., 2004; Secco et al., 2004; Bonel et al., 2005; Botta et al., 2006; Veiga et al., 2007) e a densidade do solo (Corsini & Ferraudo, 1999; Pikul Junior & Aase, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002; Tavares-Filho et al., 2006; Klein & Câmara, 2007), aumentando a porosidade total (Secco & Reinert, 1997) e a permeabilidade ao ar (Hamilton-Manns et al., 2002). A distribuição do tamanho de poros também é alterada. Em geral, observa-se um aumento na proporção de macroporos (Secco & Reinert, 1997; Corsini & Ferraudo, 1999; Hamilton-Manns et al., 2002) e uma redução na de microporos (Secco & Reinert, 1997).

A escarificação esporádica, dentro do sistema de semeadura direta, é outra prática usada pelos agricultores como alternativa para a recuperação de solos compactados. Tal operação é estimulada pelas dúvidas que, freqüentemente, surgem entre produtores e técnicos a respeito da eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos caracterizados por um elevado grau de compactação.

O primeiro ponto a ser analisado refere-se ao tempo requerido para que a recuperação física ocorra. Comparando a mobilização mecânica e as culturas de cobertura como alternativas isoladas ao controle da compactação, Unger & Kaspar

(1994) argumentam que, enquanto a diminuição da compactação do solo por plantas de cobertura é um processo lento e com comprovação ainda não unânime, o preparo com ferramentas do tipo haste, quando bem executado, elimina este problema de forma rápida e, freqüentemente, completa. Corsini & Ferraudo (1999) concluíram que, numa área fisicamente degradada, foram necessários oito anos de semeadura direta para que a densidade e a macroporosidade do solo atingissem valores semelhantes aos observados após a mobilização do solo. Hamilton-Manns et al. (2002) salientam que a produtividade de culturas implantadas sob semeadura direta em solos fisicamente degradados é insatisfatória, o que pode justificar a adoção de praticas que aliviem este problema a curto prazo, para que depois os processos naturais de recuperação, estimulados pela semeadura direta, possam agir.

As melhorias promovidas pela escarificação sobre as propriedades físicas do solo têm se refletido, em alguns casos, no aumento da produtividade das culturas. Bonel et al. (2005), em um trabalho desenvolvido na Argentina sobre um solo argilo-siltoso, observaram um aumento de 35% na produtividade da soja na área escarificada comparativamente à sob semeadura direta. Efeitos positivos da escarificação sobre a produtividade do milho também foram observados por Secco & Reinert (1997).

Klein et al., (2007) avaliaram as alterações nas propriedades físico-hídricas do solo sob PD e plantio direto escarificado (PDE), após seis anos sob PD e os efeitos de sulcadores de semeadoras-adubadoras no solo. O autor concluiu que o PDE apresentou uma densidade do solo menor que a do PD e uma maior infiltração de água, condutividade hidráulica do solo saturado e rugosidade superficial, demonstrando ser uma técnica eficaz para melhor a conservação do solo e da água, apresentando efeito residual da escarificação transcorrido um ano da operação. A porosidade total e a macroporosidade não apresentaram diferença significativa entre os manejos.

3.1.6. Adubação do solo

O adubo ou o ato de adubar os vegetais é uma prática pelo qual o homem modifica as concentrações de íons do solo de forma natural, com a finalidade de aumentar a produção das colheitas. Esta modificação costuma ser, evidentemente, em forma de incremento positivo, e os produtos utilizados variam, desde o dejetos naturais, até os adubos de mistura ou síntese química, passando pela importação de minerais ricos em nutrientes de outros lugares.

Os fertilizantes podem ser classificados sob diferentes critérios. Um critério é seu conteúdo em nutrientes; outro, a natureza, que pode ser mineral ou orgânica de seus componentes. Para atingir bons níveis de produtividade, é importante tanto a capacidade de um solo em contribuir para essa produção quanto a disponibilidade de outras entradas no sistema, como a adição de fertilizantes e o uso de práticas de melhoria e conservação do solo (Popp et al., 2002).

Os efeitos do uso de dejetos no solo, na planta e no ambiente, são variáveis e dependem da composição química e física dos dejetos, da dose aplicada, do modo de aplicação, da época, da frequência e do tempo de aplicação. Pesquisas têm indicado que o uso dos dejetos como fontes de nutrientes tem efeito significativo nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, sendo alguns deles atribuídos ao aporte contínuo de material orgânico (Sommerfeldt & Chang, 1985; Kanchikerimath & Singh, 2001), resultando no aumento da produtividade do solo (Muchovej & Obreza, 1996) e das culturas (Scherer et al., 1984; Choudhary et al., 1996) e, também, por serem fontes dos principais macronutrientes essenciais às plantas, como N, P, K, Ca, Mg e S, bem como de alguns micronutrientes. Também podem aumentar o conteúdo de C e N no solo, a atividade microbiana no solo e a qualidade dos grãos (Nyakatawa et al., 2001).

Mai et al. (2003) comprovaram que no plantio direto, quando o milho é cultivado em sucessão à aveia preta, os 20 a 30 kg ha⁻¹ de N, que são recomendados para a cultura por ocasião da semeadura, podem ser insuficientes para atender às necessidades das plantas de milho nos estádios iniciais de seu crescimento e desenvolvimento.

3.1.7. Processos de compactação do solo

A compactação é uma das principais causas da degradação da qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas. A compactação é definida por vários autores como o processo de redução de volume (compressão) de um solo não saturado por causas de natureza antropogênica, o qual se encontra relacionado com a expulsão de ar. De acordo com a profundidade em que ocorre, a compactação pode ser superficial ou subsuperficial. Devido às diferenças marcantes entre estes dois processos quanto às causas, efeitos, persistência e formas e/ou dificuldades para correção, Jorajuria Collazo (2005) propõe tratar a compactação superficial e subsuperficial como dois problemas distintos. Conforme este autor, a compactação superficial é aquela que ocorre sobre (selamento superficial e formação de crostas) ou no interior da camada arável (horizonte

Ap), enquanto que a compactação subsuperficial ocorre abaixo desta camada, em função da transmissão das tensões aplicadas na superfície do solo.

A compactação subsuperficial é muito mais persistente do que a superficial (Alakukku et al., 2003; Hamza & Anderson, 2005), pois os efeitos dos agentes descompactantes naturais, como os ciclos de umedecimento e secamento, a MOS e a atividade biológica das raízes, macro e meso fauna dos solo, são menos eficientes em profundidade (Jorajuria Collazo, 2005). As alternativas artificiais para eliminar a compactação subsuperficial (escarificação e subsolagem) são econômica e energeticamente dispendiosas, tecnicamente difíceis de serem realizadas (exigem um baixo teor de água em todo o perfil a ser mobilizado), nem sempre eficientes e podem tornar o subsolo ainda mais suscetível à recompactação (Alakukku et al., 2003; Jorajuria Collazo, 2005).

As tensões aplicadas ao solo incidem sobre suas partículas sólidas e sobre a água e o ar contidos em seus poros (Pinto, 2002). Entende-se por tensão efetiva (σ') aquela que atua sobre as partículas sólidas, sendo obtida através da equação proposta por Terzaghi & Jelinek, em 1954, válida para solos saturados (Caputo, 1988):

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (1) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

σ : tensão total aplicada;

μ : pressão da água contida dos poros ou pressão neutra.

De acordo com a Equação 1, as tensões aplicadas a um solo saturado são, num primeiro momento, suportadas pela solução do solo, gerando pressões neutras de magnitude igual a σ . Nesta condição, $\sigma' = 0$, o solo não se deforma. Se as condições permitirem drenagem, as pressões neutras promovem a saída de água dos poros e assim, $\sigma > \mu$ e $\sigma' > 0$, o solo se deforma até que a porosidade diminua de forma novamente anular $\sigma' (\sigma = \mu)$. Para condições não saturadas, a Equação 1 foi modificada em 1961 por Bishop (Williams & Shaykewich, 1970):

$$\sigma' = \sigma + X |\psi_m| \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

X: valor entre 0 e 1, proporcional ao grau de saturação do solo;

Ψ_m : potencial matricial da água no solo.

A Equação 2 evidencia que o Ψ_m age de forma equivalente à tensão aplicada à superfície do solo, ou seja, para um mesmo grau de saturação (X constante), a diminuição no Ψ_m aumenta σ' . O valor X representa a proporção do Ψ_m que contribui

para o aumento da σ' (Williams & Shaykewich, 1970). Assim, considerando Ψ_m constante, o aumento no grau de saturação resulta num incremento de σ' . Cabe salientar que quando maior for a σ' , maior será a resistência do solo à deformação e, portanto, a tensão que deve ser aplicada para comprimi-lo (Baumgartl & Horn, 1991; Zhang et al., 1997).

A resistência do solo ao cisalhamento é determinada através da equação de Coulomb (Sanchez-Giron, 1996):

$$\tau = c + \tan \varphi \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

τ : resistência do solo ao cisalhamento (kPa);

c : coesão (kPa);

σ : tensão normal ao plano de cisalhamento (kPa);

φ : ângulo de atrito interno do solo (graus).

3.1.8. Resistência mecânica do solo à penetração

A quantificação da resistência mecânica do solo à penetração (RP) é feita mediante o emprego de equipamentos denominados penetrômetros, sendo que os utilizados são os constituídos por uma haste metálica que apresenta um cone em uma das suas extremidades (Chancellor, 1994). Este equipamento mede a força por unidade de área (pressão) necessária para que o cone penetre no solo até uma determinada profundidade. Conforme o mesmo autor, as características do cone e a forma de utilização do penetrômetro influenciam nos resultados. Assim, foram desenvolvidas normas técnicas que padronizam as características construtivas e os procedimentos para a obtenção dos dados de RP. A norma ASAE S313.3 (ASAE, 2004) estabelece que, entre outros aspectos, o cone deve apresentar um ângulo de 30° em relação à vertical; a área da base do cone deve ser de 323 e de 130 mm², respectivamente, para solos macios e duros; e o desgaste máximo permitido é de 3% em relação ao diâmetro recomendado. O procedimento a ser adotado durante os ensaios é descrito na norma ASAE EP542 (ASAE, 1999). Os aspectos de maior relevância a serem observados referem-se à velocidade de penetração (constante e igual a 30 mm s⁻¹), ao teor de água de solo (execução do ensaio próximo à umidade da CC).

A RP aumenta e diminui, respectivamente, com a redução do teor de água e da densidade do solo (Klein et al., 1998; Tormena et al., 1998; Torres & Saraiva, 1999; Silva, 2003; Genro Junior et al., 2004; Cavalieri et al., 2006). A diminuição da RP com

o incremento da umidade é mais pronunciada para solos argilosos, comparativamente aos arenosos (Mapfumo & Chanasyk, 1998). Por outro lado, o aumento da RP em função do incremento da densidade do solo torna-se menos evidente à medida que o teor de água aumenta (Klein et al., 1998; Torres & Saraiva, 1999; Camara & Klein, 2005; Cavalieri et al., 2006), indicando que, em solos úmidos, a RP é menos sensível na detecção de camadas compactadas. Diante disso, a análise correta dos dados de RP exige o conhecimento do teor de água sob o qual a avaliação foi executada. A RP é afetada ainda pelas propriedades mecânicas do solo, tais como a resistência ao cisalhamento (Bradford, 1986; Chancellor, 1994).

Embora o crescimento radicular seja altamente correlacionado com a RP, os mecanismos de atuação das raízes e dos penetrômetros são notadamente distintos (Leão, 2002). Assim, a resistência do solo ao cone pode ser de duas a oito vezes maior que aquela encontrada pelas raízes, o que é atribuído à incapacidade do penetrômetro em acompanhar as irregularidades dos poros pré-existentes no solo (Bengough & Mullins, 1990). A principal vantagem da utilização da RP refere-se à facilidade e rapidez de execução do ensaio (Chancellor, 1994). Silva (2003) acrescenta que o uso de penetrômetro permite a avaliação do estado de compactação em pequenos intervalos de profundidade, o que nem sempre é possível quando se utiliza outras análises físicas. Além disso, a RP parece ser um indicador da qualidade estrutural do solo mais sensível a mudanças do manejo, comparativamente à densidade do solo (Abreu et al., 2004; Bonel et al., 2005; Botta et al., 2006). A principal desvantagem da resistência à penetração é a sua dependência em relação ao teor de água, o que dificulta a comparação dos resultados obtidos em diferentes locais/épocas (Raper, 2005).

O valor de 2 MPa tem sido indicado como o limite de RP acima do qual o crescimento radicular é prejudicado (Imhoff, 2002). No entanto, este valor é grandemente variável entre as diferentes espécies vegetais e estádios de desenvolvimento das mesmas, bem como em função do tipo de solo e das características do penetrômetro utilizado. Valores críticos de RP determinados, inferiores a 2 MPa, são relatados em diversos trabalhos de pesquisa (Rosolem et al., 1994; Foloni et al., 2003; Rosolem et al., 2002; Beutler & Centurion, 2004). Em solos caracterizados por um elevado grau de compactação, o valor crítico de RP pode ser inferior a 2 MPa, devido à quebra da continuidade dos poros (Lipiec & Hakansson, 2000). Em contrapartida, Klein & Camara (2007), trabalhando em um Latossolo Vermelho, argiloso, concluíram que

uma RP de 2,0 MPa na camada de 0,0 - 0,25 m, em condições de semeadura direta, não foi limitante à produtividade da soja.

Os tipos de solo, as condições climáticas, os sistemas de culturas utilizados, o tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e as condições de umidade do solo em que são realizadas as operações no campo determinam a magnitude dos efeitos do manejo sobre as propriedades físicas do solo (Abrão et al. 1979, Eltz et al., 1989). Em solos sob plantio direto normalmente tem-se observado um aumento do conteúdo de água (Salton & Mielniczuk, 1995). Segundo Imhoff et al. (2000), a σ_p e a RP são dependentes da umidade e da densidade do solo.

Comparando o sistema de plantio convencional com o plantio direto, Costa et al. (2003) observaram que os solos sob plantio direto tiveram melhores condições estruturais, evidenciadas, principalmente, pela redução da densidade em superfície e pelo aumento da estabilidade de agregados.

Ao analisar o efeito da densidade do solo (D_s) e da umidade volumétrica (U_v) nos valores de RP, Lima (2004) obteve uma relação significativa positiva e linear entre a σ_p e a resistência à penetração, medida em laboratório e a campo. O mesmo autor afirma também que a σ_p pode ser adequadamente estimada a partir de uma propriedade de fácil determinação, como a resistência mecânica do solo à penetração, medida diretamente a campo.

Aqui cabe esclarecer que o termo “fácil”, usado pelo autor antes citado, é muito relativo, porque tudo vai depender da área a ser medida. Então, no caso deste trabalho, a determinação não seria assim “fácil”, se fosse o caso.

4. Estudo I: ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL COM DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE (PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO) E SUSCETIBILIDADE DO SOLO À COMPACTAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

4.1.1. Compressibilidade do solo

A compressibilidade do solo é a variação do volume em resposta a uma pressão aplicada. O volume total do solo consta do volume de partículas sólidas e do volume de vazios, sendo o volume de vazios formado pelo volume de água e pelo volume de ar. A compressão tem como resultado o decréscimo do índice de vazios devido ao aumento gradativo da carga aplicada. Ela pode ser expressa em densidade do solo (g cm^{-3}) ou em índice de vazios (e), dado pela relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (Larson et al. 1980; Dexter, 1988; Koolen & Kuiper, 1989).

O processo de compressão descreve a compactação (expulsão do ar) e a consolidação (expulsão da água) do solo, quando submetido à determinada pressão externa (Debiasi, 2008).

Sempre que o solo sofre cargas externas, ocorre o processo de compactação, o que resulta em modificações na estrutura, com o aumento da densidade e da resistência do solo (Kondo & Dias Junior, 1999). A compactação afeta indiretamente a infiltração e condutividade da água, aeração e temperatura do solo. Segundo Stepniewski et al. (2002), as alterações físicas, provocadas pela compactação, afetam o fluxo ou a concentração de água, oxigênio, dióxido de carbono, nutrientes e temperatura, o que pode limitar o crescimento e o desenvolvimento das plantas e causar problemas ambientais. Com isso, a compactação do solo tem provocado perda de produtividade, levando-o à degradação parcial ou total.

Quando o solo, com determinada umidade, é tensionado com pressões menores que a pressão de pré-consolidação (σ_p) ou crítica (σ_c) (Figura 2), a deformação é pequena, pouco elástica e reversível (Larson et al., 1980; Lebert & Horn, 1991). Neste estudo, a pressão de pré-consolidação é aquela acima da qual ocorre significativa deformação da estrutura do solo. Se a carga ultrapassar a pressão de pré-consolidação,

dependendo da textura do solo, a deformação pode ser plástica e irreversível. A pressão de pré-consolidação representa a maior pressão a que o solo foi submetido no passado (Casagrande, 1936), sendo, portanto, um indicativo da sua história de tensão (Dias Junior, 1994). A história de tensão do solo reflete o tipo de manejo ao qual o solo foi submetido (Dias Junior & Pierce, 1996), dependendo do comportamento compressivo do mesmo, da sua história de tensão e, principalmente, da variação do teor de água do solo (Dias Junior, 1994). As pressões adicionais, que excedem a pressão de pré-consolidação, determinam modificações na densidade e na porosidade ou índice de vazios, conforme a reta virgem (C_v), que representa a compressibilidade do solo.

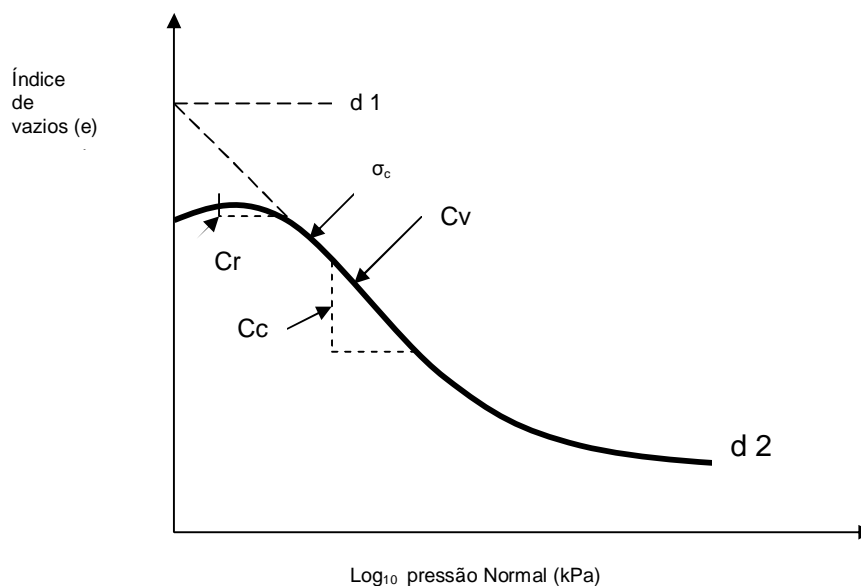


FIGURA 2. Curva característica de compressibilidade de um solo submetido a pressões crescentes (Lebert & Horn, 1991), onde d1 e d2 = densidade mínima e máxima; Cr = curva de recompressão; σ_p = pressão crítica; Cc = índice de compressão e Cv = reta virgem.

O entendimento do comportamento compressivo do solo, utilizando as curvas de compressão, adquire uma grande importância em razão de serem elas a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo mais adequado para o solo. Inicialmente, esta teoria foi desenvolvida para o estudo da compressibilidade de solos para obras de engenharia, em condições de solo saturado e elevadas pressões. Entretanto, Larson et al. (1980) e Lebert & Horn (1991) mostraram que esta relação também é válida para os solos estruturados e sob condições não saturadas, nas faixas de pressões de 50 a 300 kPa, que são valores normalmente exercidos pelos tratores e implementos agrícolas sobre o solo.

Na curva de recompressão (Cr) ocorre apenas uma pequena deformação até o ponto σ_p , porque a resistência ao cisalhamento é suficiente para suportar as cargas menores ou iguais aquelas que o solo já havia sido submetido (Baumgart & Horn, 1991). Este comportamento é explicado pela equação de resistência ao cisalhamento, ou seja, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 3), da página 17.

Quando é conhecida a reta virgem da curva de compressão, sob determinada unidade, é possível prever-se a densidade do solo em maiores cargas. Larson et al. (1980) determinaram as curvas de compressão de 36 classes de solos agrícolas, de diversos países, estabelecendo a seguinte equação:

$$d_2 = d_1 + C_c \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

d_2 é a densidade a ser estimada, d_1 a densidade em uma pressão p_1 , e p_2 é a pressão a ser aplicada e C_c a declividade da reta.

Day & Holmgren (1952), examinando ao microscópio seções polidas de solo, observaram o arranjo inter e intra-agregados de seções compactadas e sem compactação. Em amostra compactada com a pressão de 49 kPa, houve pouca deformação nos agregados. Com pressão de 148 kPa, ocorreu fluxo plástico. Segundo estes autores, a deformação plástica é dominante na compressão de solos argilosos com teor de umidade entre o limite de plasticidade e o limite de liquidez, enquanto a deformação não plástica é dominante em solos secos. Quando os agregados foram comprimidos sob teores baixos de umidade, houve apenas a ruptura nos pontos de contato entre os mesmos.

Em testes de compressibilidade, à medida que diminui o índice de vazios, aumenta o grau de compactação.

A compactação máxima de um solo pode ser obtida em laboratório pela aplicação de pressão sobre o mesmo. O grau de compactação de um determinado solo é a relação entre sua compactação a campo e a compactação máxima possível em laboratório, sob determinada aplicação de energia. Cada solo apresenta um teor ótimo de umidade para se obter a máxima compactação (Figura 3). É importante ressaltar que a expressão “teor ótimo de umidade” neste caso teria validade na área da engenharia civil, já que para a agricultura o objetivo é contrário, ou seja, na agricultura a meta é evitar que o solo alcance a compactação máxima. Quanto maior o grau de compactação,

menor será o índice de compressibilidade, devido à maior resistência ao cisalhamento do solo compactado.

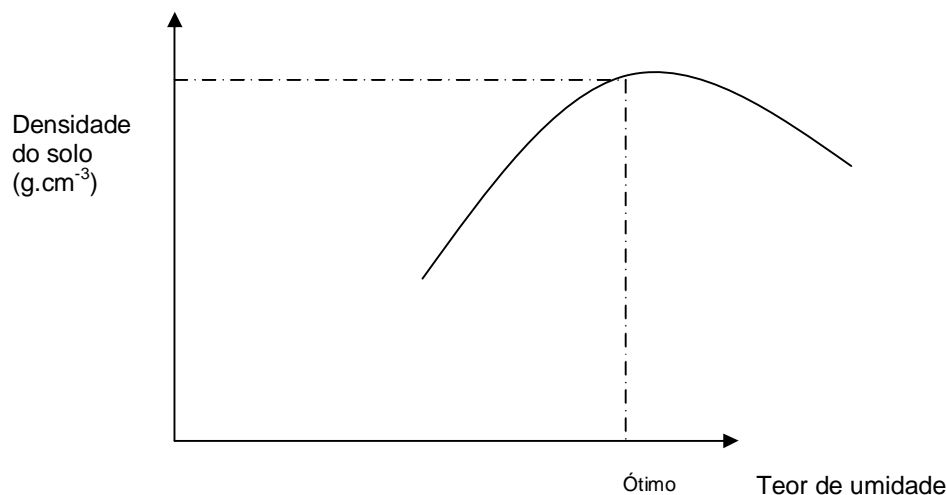


FIGURA 3. Relação entre o aumento do teor de umidade e a variação da densidade do solo submetido a um nível de energia (Mantovani et al., 1992).

A compactação do solo somente ocorre quando a tensão efetiva, produzida pela aplicação de uma carga na sua superfície, ultrapassar a resistência ao cisalhamento existente nos pontos de contato entre as partículas, provocando a movimentação e acomodação das mesmas (Braidá, 2004). Desse modo, a estratégia mais eficaz para evitar o desenvolvimento de camadas compactadas envolve a aplicação de tensões externas que não excedam a capacidade de suporte do solo (Alakuku et al., 2003), a qual pode ser estimada pela tensão de pré-consolidação - σ_p (Dias Junior & Pierce, 1996).

A σ_p é obtida a partir da curva de compressão do solo, que relaciona o índice de vazios ao logaritmo da carga aplicada. Em solos já submetidos a tensões externas, a curva de compressão apresenta um formato curvilíneo, podendo a mesma ser dividida em dois segmentos: um curvo e outro reto (Lebert & Horn, 1991). As deformações que ocorrem no segmento curvo, denominado de curva de compressão secundária, são elásticas (reversíveis), enquanto que as que ocorrem na porção linear, chamado de reta de compressão virgem, são plásticas (irreversíveis). A σ_p é a tensão que separa esses dois segmentos, sendo, portanto, um indicador da máxima carga e/ou tensão de água mais negativa ao qual o solo foi submetido (Veiga et al., 2007).

A tangente do ângulo de inclinação da reta de compressão virgem corresponde ao índice de compressibilidade (IC), que reflete a suscetibilidade do solo à

compactação. Os fatores que controlam a magnitude da σ_p e do IC são a densidade inicial e os teores de água e de argila (Imhoff, 2002), bem como a estrutura do solo (Rücknagel et al., 2007; Veiga et al., 2007). O efeito exercido pelo teor de água do solo sobre a σ_p é de interesse prático em nível de lavoura. A relação σ_p X teor de água do solo têm sido estabelecida para diferentes solos e sistemas de manejo, mediante o ajuste empírico dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo – MCSCS (Kondo & Dias Junior, 1999; Miranda, 2006), sendo o modelo mais utilizado atualmente o desenvolvido por Dias Junior (1994). Considerando um determinado teor de água no solo, os MCSCS permitem conhecer a máxima tensão que pode ser aplicada ao mesmo sem ocasionar compactação adicional. Por outro lado, para uma dada tensão a ser imposta ao solo, os MCSCS possibilitam o estabelecimento de teores máximos de água sob os quais o tráfego pode ser realizado sem resultar em deformação significativa do solo. Cabe destacar que os MCSCS podem ser alterados pelo manejo do solo, conforme comprovado em estudo realizado por Assis & Lanças (2005).

Existe pouca informação no que se refere aos efeitos produzidos pela inclusão de plantas de cobertura em sistemas de rotação de culturas sobre a capacidade de suporte de carga do solo e a suscetibilidade do solo à compactação. É possível que esta prática afete a σ_p e o IC, uma vez que as plantas de cobertura modificam a estrutura do solo, formando e estabilizando agregados de maior tamanho (Wohlenberg et al., 2004; Conceição et al., 2005), o que ocorre, principalmente, em função do aporte de resíduos orgânicos e exsudatos radiculares e da ação mecânica das raízes das espécies do sistema de rotação de culturas (Oades, 1993; Haynes & Beare, 1996). Por um lado, a resistência à deformação tende a ser maior em solos agregados (Veiga et al., 2007), assim como a resistência dos agregados à ruptura aumenta com o incremento do teor de MOS (Imhoff, 2002). Em contrapartida, a formação de agregados maiores, ao aumentar a proporção de macroporos e, eventualmente, diminuir a densidade do solo, pode diminuir a capacidade de suporte de carga do mesmo (Macedo, 1993; Pereira et al., 2005; Rücknagel et al., 2007). Além disso, as diferenças no IC e na σ_p , ocasionadas pelas plantas de cobertura, podem ser minimizadas pelo tráfego, em virtude da provável destruição da estrutura do solo produzida por aquele.

Da mesma forma, são poucos os trabalhos que comparam os efeitos de práticas biológicas (plantas de cobertura) e mecânicas de controle da compactação (escarificação) sobre a σ_p e o IC. A redução do grau de compactação do solo por meio da mobilização mecânica acarreta na ruptura das ligações que se estabelecem entre as

partículas e agregados do solo (Dexter, 1988). Em função disso, é provável que a escarificação aumente a suscetibilidade à compactação e diminua a capacidade de suporte de carga do solo de uma maneira mais pronunciada, comparativamente às plantas de cobertura de inverno.

A curva de compressão do solo, a qual relaciona a deformação com a carga aplicada, permite estimar parâmetros que auxiliam na hora de analisar a compactação do solo. A curva de compressão relaciona o índice de vazios com o logaritmo da pressão aplicada. É a partir dela que se obtém a pressão de pré-consolidação (σ_p), que é a estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (Dias Junior & Pierce, 1996), e o índice de compressibilidade do solo (IC), que é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação (Larson et al., 1890; Holtz & Kovacs, 1981). Quando o solo sofre pressões menores que a pressão de pré-consolidação ocorre principalmente deformação elástica, a qual é recuperável, mas quando se aplicam pressões maiores, ocorre uma deformação plástica, que é não recuperável (Holtz & Kovacs, 1981).

Assim, a pressão de pré-consolidação reflete as tensões que o solo já foi submetido e o IC revela a suscetibilidade do solo à compactação. O IC indica a variação do índice de vazios do solo por unidade, em função do logaritmo da pressão aplicada, onde o IC é determinado pela inclinação da reta virgem do solo. A determinação da pressão de pré-consolidação e do coeficiente de compressibilidade tem grande importância na adequação de máquinas que exercem pressões menores sobre o solo e, se o valor da σ_p for superado, podemos estimar o quanto de compactação adicional ocorrerá (Kondo & Dias Junior, 1999).

Através de ensaios de compressibilidade, pode-se verificar se os solos receberam pressões anteriores ou não. Essa relação é verificada na Figura 2, no qual o índice de vazios, a qualquer pressão aplicada, comporta-se como uma reta, indica que qualquer carregamento resultará em deformação irreversível.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Solo

As amostras de solo foram coletadas na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), localizada na região fisiográfica da Depressão Central (RS). A localidade se caracteriza por apresentar um relevo formado por planícies aluviais amplas e pendentes sedimentares onduladas com dezenas de metros.

O clima da região, segundo a classificação de Köeppen, é do tipo “Cfa” - subtropical úmido e sem estiagem - com a temperatura do mês mais frio oscilando entre -3 °C e 18 °C e a do mês mais quente superior a 22 °C. A precipitação pluviométrica média anual da região fica ao redor de 1.400 mm, com média mensal de 120 mm (Bergamaschi & Guadagnin, 1990).

O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 1999), possuindo textura superficial franco-argilo-arenosa, horizontes diagnósticos A moderado e B textural, drenagem moderada, declividade média de 0,10 m m⁻¹ e profundidade efetiva inferior a 80 cm (Lopes, 1984).

4.2.2. Histórico da área de estudo

A área escolhida para este estudo esteve até o ano de 2000 sob campo nativo. A primeira cultura estabelecida na área foi soja no ano de 2000. Os tratamentos do experimento estão dispostos em parcelas reunidas em blocos, conforme o manejo da adubação e da irrigação. Em quatro blocos foram aplicados fertilizante mineral e em dois blocos cama de aviário como fertilizante orgânico, cujos valores totais adicionados nos diferentes blocos constam nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Adicionalmente, os tratamentos com adubação mineral foram subdivididos em dois, com e sem irrigação por aspersão. Esses procedimentos definiram três grandes categorias de tratamentos: adubação mineral irrigado; adubação mineral e adubação orgânica (Figura 4). Estes tratamentos formaram três blocos, com duas repetições.

TABELA 1. Quantidades de cama de aviário, equivalente em corretivo de acidez, nutrientes e metais pesados, adicionados nos tratamentos com adubação orgânica, nos sistemas de manejo de solo e de culturas (sucessão e rotação).

Matéria/ Elementos ⁽¹⁾	Unidade	Aplicação de 2005 a 2007	Aplicações acumuladas	
			Sucessão	Rotação
Cama de frangos “in natura”	kg ha ⁻¹	15.600	47.270	52.150
Cama de frangos base seca		11.900	36.578	40.398
Eq. CaCO ₃		736	3.131	3.513
C. orgânico		4.099	11.442	12.588
N		288	780	849
P ₂ O ₅		446	1.191	1.288
K ₂ O		327	984	1071
Ca		219	1.924	2.233
Mg		96	261	282
S		41	140	155
Fe		108	161	165
Na		43	223	252
Cu		3,6	7,9	8,1
Zn		3,7	15,2	16,9
Mn		5,8	19,1	20,8
B	g ha ⁻¹	370	820	880
Cd		3,6	11	12
Cr		131	400	440
Ni		155	480	530
Pb		48	150	160

⁽¹⁾ Quantidades totais.

TABELA 2. Quantidades de materiais e nutrientes adicionadas nos tratamentos com adubação mineral nos sistemas de manejo do solo e de culturas (sucessão e rotação).

Material/ Elemento	Unidade	Quantidades aplicadas 2005-2007	Acumulação (2000-2007)	
			Sucessão	Rotação
Calcário	kg ha ⁻¹	-	5.000	5.000
Uréia		220	756	961
Superfosfato triplo		200	775	775
Superfosfato simples		-	300	300
Fosfato diamônio		200	300	300
NPK 5-30-10		-	200	200
NPK 5-20-20			100	100
Nutrientes				
N		130	403	496
P ₂ O ₅		174	593	593
K ₂ O		-	40	40

4.2.3. Tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso e os blocos foram dimensionados de forma que facilitassem a mecanização dos tratos culturais. Desta forma as dimensões dos blocos são de 25 m x 30 m, com 20 m para os corredores entre blocos. Cada bloco foi dividido em quatro parcelas com dimensão de 7,5 m x 25 m. Os métodos de preparo do solo compreenderam: semeadura direta (PD) - com semeadoras específicas; preparo mínimo ou reduzido (PR) - escarificação com equipamento munido de hastes com ponteiros estreitas e na profundidade de 25 cm, com rolo destorroador acoplado; e preparo convencional (PC) - arado de três discos a 25 cm de profundidade, seguido de duas passagens com grade niveladora de discos. O trator usado para os trabalhos foi um John Deere modelo 5600 com TDA (tração dianteira auxiliar).

Adicionalmente aos tratamentos apresentados, as parcelas foram submetidas a diferentes sistemas de culturas. Nos anos de condução do experimento foram empregadas as culturas de soja-trigo-milho-aveia-soja no sistema rotação de culturas, e soja-aveia+ervilhaca-milho, no sistema sucessão de culturas.

A disposição dos diversos tratamentos consta no croqui (Figura 4).

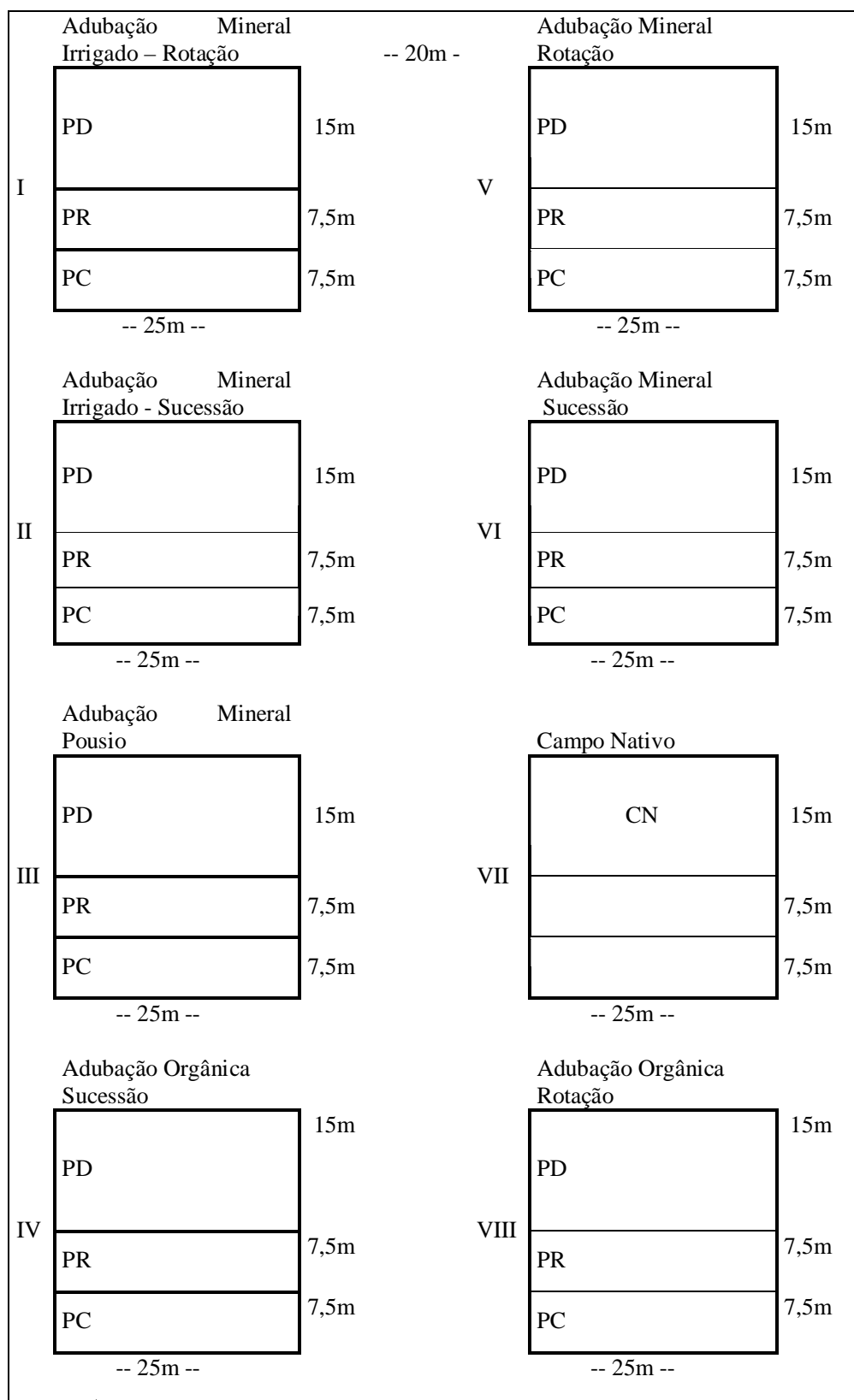


FIGURA 4. Croqui da área experimental.

4.2.4. Máquinas e implementos agrícolas

As operações de preparo do solo, semeadura e manejo das parcelas foram realizados com um trator John Deere modelo 5600, 4x2 com TDA (tração dianteira auxiliar, diferente do trator 4x2 comum, apesar do maior diâmetro das rodas traseiras, todas as quatro rodas têm garras), potência máxima do motor de 53 kW ou 75 cv, massa total de 3.835 kg (1.530 kg sobre o eixo dianteiro e 2.305 kg sobre o traseiro), pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-R1, com pressão de inflação de 95 e 110 kPa, respectivamente. Além do trator, foram utilizadas as seguintes máquinas e equipamentos:

- Semeadora-adubadora múltipla (precisão e fluxo contínuo), marca Vence Tudo, modelo AS 11500, montada ao sistema hidráulico de três pontos do trator.
- Escarificador, marca JAN, modelo Jumbo-Matic, de arrasto, composto por cinco hastes, ponteiros estreitos (0,075 m de largura), ângulo de ataque da ponteira em relação ao solo de 18°, equipado como rolo destorroador e discos lisos para corte da palha.
- Pulverizador de barras, capacidade do depósito de 400 L, 9,5 m de barra, montado.
- Arado de 3 discos de 28" de diâmetro cada um, montado, reversível.
- Grade niveladora excêntrica com 28 discos de 18" de diâmetro cada um, de arrasto.

4.2.5. Avaliações

A coleta dos solos para os ensaios de compressão uniaxial foi realizada nas diferentes parcelas de cada bloco. Foram abertas duas trincheiras, próximas uma da outra e em cada trincheira foram coletadas duas amostras, totalizando quatro repetições para cada sistema de manejo. As 88 amostras com estrutura preservada foram coletadas, ao acaso, em cilindros de 6,50 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura, em média (Figura 5). As amostras de compressibilidade foram coletadas no mês de maio de 2008, nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade nos oito blocos do Argissolo Vermelho Distrófico típico, submetidos a diferentes sistemas de preparo do solo. No bloco sete, foram coletadas amostras só na área de campo nativo (CN) - (Figura 4). É importante salientar que a parcela de campo nativo (CN) é uma referência (testemunha), pois não é feita adubação e não há pastejo de bovinos. No entanto, não é uma área completamente isenta de tráfego, já que se realizam duas roçadas (trator + roçadora) por ano.

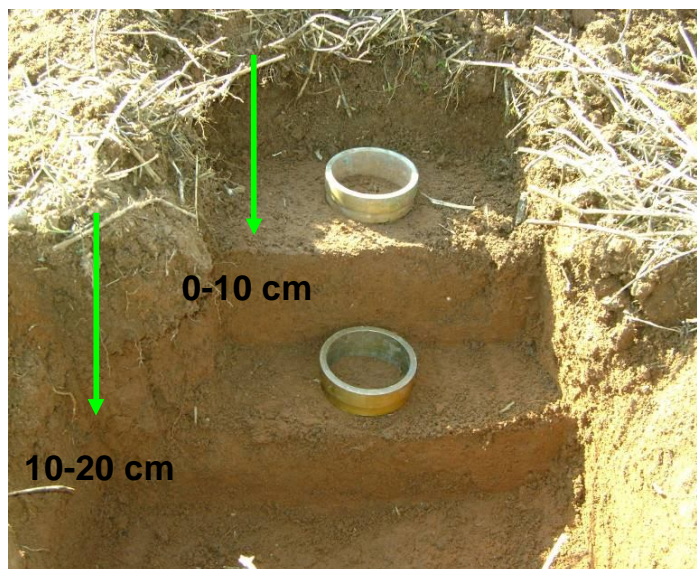


FIGURA 5. Trincheira aberta e anéis usados para a coleta das amostras indeformadas para o ensaio de compressibilidade do solo.

Os blocos amostrados, além dos sistemas de preparo, apresentavam adubação mineral com e sem irrigação (dois e três blocos, respectivamente) e dois blocos com adubação orgânica, sem irrigação.

Após o preparo das amostras, elas foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, onde na Figura 6 (A e D), pode-se ver a amostra antes e depois de ser prensada. Este teste foi realizado seguindo a norma NBR-12007/90, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, com algumas alterações. Nesse trabalho, após a coleta, as amostras foram fechadas e vedadas, guardadas em uma caixa isopor, as mesmas não foram saturadas já que a coleta foi feita dois dias depois de uma semana de chuvas; as amostras foram processadas na umidade “de campo”, aplicando cargas sucessivas e estáticas para gerar carga de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa, durante cinco minutos em cada. Nesse tempo, ocorre 99% da deformação do solo (Carpenedo, 1994; Silva et al., 2000) .

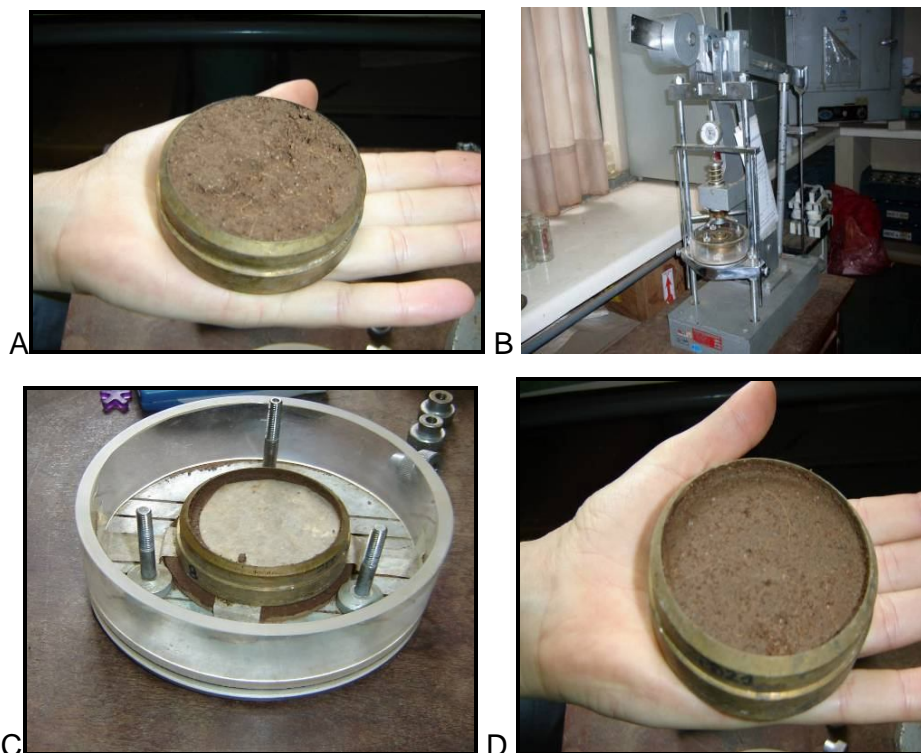


FIGURA 6. Determinação da compressibilidade do solo utilizando a prensa oedométrica. (A) Amostra no anel volumétrico antes de ser colocada na prensa; (B) Prensa oedométrica uniaxial; (C) Retirada da amostra da prensa; (D) Amostra prensada.

A partir da deformação observada aos 5 minutos (*def*, em cm), do volume inicial da amostra (*V_i*, em cm³), do peso da amostra (*P_a*, em g) e seca em estufa a 105° C (*P_s*, em g), calculou-se o índice de vazios ao fim de cada carregamento (*E_f*), através das Equações 5 a 8.

$$P_{ti} = \frac{P_{sat} - P_s}{\pi r^2 h} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

P_{ti}: porosidade total inicial, em m³ m⁻³;

R: raio do anel volumétrico, em cm;

h: altura do anel volumétrico, em cm.

$$D_{sf} = \frac{P_s}{\pi r^2 (h - def)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

- D_{sf} : densidade do solo, decorrido o tempo da aplicação de uma determinada carga, em $Mg\ m^{-3}$.

$$P_{tf} = P_{ti} - \left[\frac{V_i - \frac{P_s}{D_{sf}}}{V_i} \right] \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

- P_{tf} : porosidade total decorridos 5 minutos da aplicação de uma determinada carga, em $m^3\ m^{-3}$.

$$E_f = \frac{P_{tf}}{1 - P_{tf}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

- E_f : índice de vazios decorridos 5 minutos da aplicação de uma determinada carga, adimensional.

Posteriormente, se fez uma relação do E_f com o logaritmo da tensão aplicada, obtendo-se a curva de compressão (Figura 7). Para a determinação da σ_p e do IC, utilizou-se o método de Pacheco Silva, descrito na norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990) e ilustrado na Figura 7. Primeiro, traça-se uma reta paralela (reta 1) ao eixo das abscissas, tendo como origem o índice de vazios inicial da amostra (e_i). Depois, a reta virgem é prolongada até interceptar-se com a reta 1. Do ponto de intersecção, desenha-se uma reta vertical paralela ao eixo das ordenadas (reta 2) até a mesma encontrar a curva de compressão. Finalmente, traça-se outra reta (reta 3), paralela ao eixo das abscissas, a partir do ponto de intersecção entre a reta 2 e a curva de compressão, até o prolongamento da reta virgem. A abscissa deste ponto corresponde à σ_p .

É importante ressaltar que todo esse procedimento de cálculo foi realizado mediante o emprego de uma planilha eletrônica do Microsoft Excel, desenvolvida por Cepik (2006), e como as amostras não foram saturadas antes, para compensar o peso saturado das amostras, foram adicionados, 10 gramas para cada amostra antes de iniciar o teste de compressibilidade.

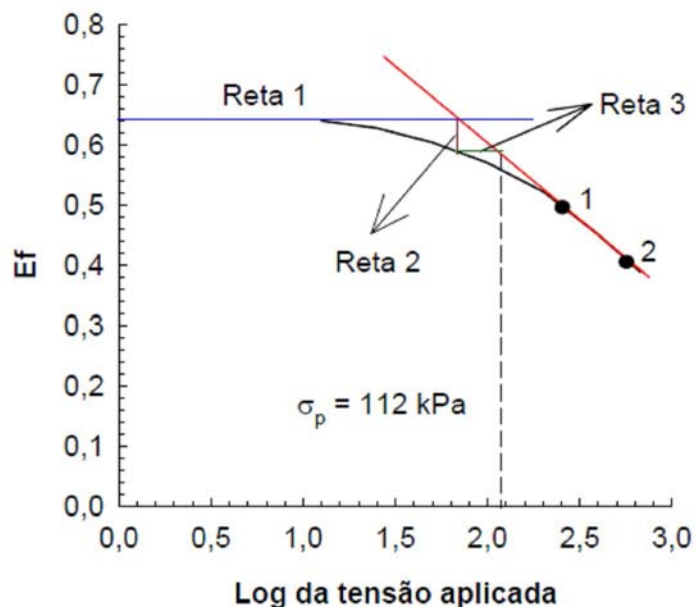


FIGURA 7. Curva de compressão do solo que ilustra a metodologia de Pacheco Silva para a determinação da tensão de pré-consolidação (σ_p).

O IC correspondeu à tangente do ângulo de inclinação da reta de compressão virgem, sendo calculada através da Equação 9.

$$IC = \frac{e1 - e2}{\log P2 - \log P1} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

IC: índice de compressibilidade

e1: índice de vazios no ponto 1

e2: índice de vazios no ponto 2

P1: tensão aplicada correspondente ao e1

P2: tensão aplicada correspondente ao e2.

4.2.6. Obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (MCSCS)

Os modelos foram ajustados de acordo com a Equação 10, desenvolvida por Dias Junior (1994), usando-se o software Sigmaplot 9.0 (Systat software, Inc.).

$$\sigma_p = 10^{(a+bw)} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

w: umidade gravimétrica do solo no momento da realização do ensaio de compressão uniaxial (kg kg^{-1});

a e b: parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

O ajuste dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo foi executado separadamente para cada sistema de preparo e camada avaliada.

4.3. ANÁLISES LABORATORIAIS

A quantificação dos atributos físicos do Argissolo foi realizada segundo os métodos descritos em Embrapa (1997). Em virtude das análises terem sido realizadas sem repetições, não foi possível analisar estatisticamente.

4.3.1. Teor de água no solo

As determinações da umidade gravimétrica (U_g) e volumétrica (U_v) foram realizadas a partir das amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos para a quantificação da densidade do solo. Após coletadas, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da UFRGS, onde foi quantificada sua massa úmida (M_u), expressa em gramas.

Após a quantificação da M_u , as amostras foram secas em estufa a 105°C por um período de aproximadamente 72 horas, até que permanecessem com massa constante. Uma vez secas, as amostras foram resfriadas e novamente pesadas, para obtenção da massa de solo seco (M_{ss} , em gramas). Nos anéis também foram quantificados o diâmetro e a altura utilizando-se paquímetro, visando à obtenção de seus volumes.

Tendo esses dados, foram calculadas as umidades gravimétrica (kg kg^{-1}) e volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) pelas Equações 11 e 12:

$$U_g = \frac{MSU - MSS}{MSS} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

U_g : umidade gravimétrica;

MSU: massa de solo úmido;

MSS: massa de solo seco.

$$U_v = \frac{V_{\text{água}}}{VT} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

Uv: umidade volumétrica;

V água: volume de água;

VT: volume total (poros + água).

4.3.2. Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo, foram usadas as mesmas amostras coletadas para o ensaio de compressibilidade em cilindros metálicos de volume conhecido de 78 cm³, nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Após a retirada das amostras, as mesmas foram acondicionadas em latas de alumínio, as quais foram tampadas e isoladas através de fita adesiva com o objetivo de não perderem a umidade. Após a determinação da umidade das mesmas, no laboratório de Física do solo da UFRGS, procedeu-se o cálculo para obtenção da densidade do solo pela Equação 13.

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

Mss: massa de solo seco (g cm⁻³);

Vt: volume total da amostra (cm³).

Nas determinações que envolvem a densidade de partículas, foi usado o valor médio de 2,65 g cm⁻³.

4.3.3. Matéria orgânica do solo (MOS)

O teor de matéria orgânica das amostras foi determinado na forma de carbono orgânico total (COT), com o uso de um analisador de carbono, Modelo TOC-V CSH Shimadzu, dotado de um amostrador para sólidos (Solid Sample Module SSM-5000A). Para tal, as amostras de solo coletadas foram secas, trituradas em gral de ágata e analisadas em uma única via.

O analisador de carbono quantifica o carbono total (CT) e carbono inorgânico (CI) da amostra. O COT é dado pela subtração de CT e CI. Para a determinação de carbono total, a amostra injetada no equipamento, é carregada para um tubo de combustão a 680°C, sendo oxidado a CO₂. Para a determinação de carbono inorgânico, a amostra

injetada reage com meio ácido e é igualmente convertido a CO_2 . O CO_2 produzido é quantificado por absorção no infravermelho não dispersivo. As concentrações de CT e CI são obtidas por interpolação, utilizando curvas analíticas (área do pico x concentração) feitas previamente por injeção de padrões (Fonseca et al., 2006).

4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Na análise estatística foi utilizado o pacote estatístico SAS, onde foram feitas as comparações de médias pela Diferença Mínima Significativa (DMS) com 1% e 5% de significância.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Compressibilidade do solo

A obtenção da carga máxima que o solo pode suportar em relação ao teor de água no solo que ele representa, constitui uma das principais utilidades da determinação da pressão de pré-consolidação (Debiasi et al., 2006). Por isso, neste capítulo, a determinação da pressão de pré-consolidação é o ponto principal, por ser esta uma informação muito importante para as operações agrícolas, já que um solo pode compactar-se quando as pressões são superiores a esta, mesmo trabalhando dentro da faixa de friabilidade.

Os valores médios da densidade do solo, umidade volumétrica, índice de vazios, grau de saturação, pressão de pré-consolidação, coeficiente de compressibilidade, teor de MO e índice de relaxamento do solo, obtidos nos diferentes sistemas de preparo em estudo, constam na Tabela 3.

TABELA 3. Densidade do solo (D_s), teor de água inicial no solo (TAI), umidade volumétrica inicial (Uvi), índice de vazios (e), grau de saturação inicial (Gsi), pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de compressibilidade (IC), índice de relaxamento (IR) e matéria orgânica (MO) de um Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Preparos	D_s ($Mg\ m^{-3}$)	TAI	UVI ($m\ m^{-3}$)	(e)	GSI (%)	M.O (%)	IC	IR	σ_p (kPa)
0- 10 cm									
PD	1,57	0,13	0,20	0,49	60,88	3,89	0,22	0,05	74,46
PR	1,48	0,14	0,20	0,50	61,21	3,57	0,24	0,06	54,44
PC	1,47	0,14	0,20	0,50	61,22	3,20	0,26	0,07	52,45
CN	1,74	0,15	0,26	0,66	65,14	4,57	0,26	0,05	86,60
10-20 cm									
PD	1,67	0,14	0,23	0,58	64,10	2,66	0,22	0,03	91,87
PR	1,50	0,13	0,19	0,47	59,28	2,57	0,26	0,06	60,00
PC	1,64	0,14	0,23	0,55	63,40	2,74	0,23	0,03	90,54
CN	1,66	0,08	0,14	0,38	50,21	3,21	0,17	0,02	124,38

PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido e PD= plantio direto

A curva de compressão foi a ferramenta utilizada para determinar a suscetibilidade do solo sob diferentes sistemas de preparo, propriedade representada pela tensão de pré-consolidação (σ_p), o índice de compressão (IC) e o índice de relaxamento (IR). Esperava-se que houvesse diferenças entre os valores da pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e do índice de relaxamento nos diferentes sistemas de preparo, já que estes apresentam diferentes densidades do solo iniciais (Tabela 3).

Na camada de 0-10 cm, como na de 10-20 cm nos distintos preparos, a capacidade de suporte (σ_p) comportou-se na seguinte ordem: PR<PC<PD<CN. A maior σ_p ocorreu no PD e CN e os tratamentos PC e PR obtiveram tensões praticamente iguais na camada de 0 a 10 cm. Nessa profundidade, o CN apresentou tensão de pré-consolidação 1,6 vezes superior a dos dois últimos sistemas citados, enquanto que na camada de 10 a 20 cm, o CN apresentou uma pressão de pré-consolidação duas vezes maior que no PC e PR (Tabela 3).

Este fato indica que o CN apresenta uma maior capacidade de suporte de cargas sem que ocorra compactação adicional, e o inverso ocorre com o PC e PR. Outro fator que confirma a maior suscetibilidade à compactação do sistema PR é a maior inclinação da reta virgem de compressão dado pelo IC, que foi superior aproximadamente duas vezes ao valor encontrado para o CN. Isto implica que o solo sob preparo reduzido ou preparo convencional está mais suscetível às deformações plásticas irreversíveis que no

CN. De forma geral, quanto menor é o valor de IR ou IC, melhor, porque implica menor suscetibilidade à compactação.

As diferenças entre os sistemas poderiam ser explicadas em parte pelas diferenças na densidade inicial, sendo superior no CN. Com isso a maior σ_p no CN pode ser justificado pela alta densidade, o menor espaço poroso e também pelos menores teores de água neste, comparados com os preparos com menor pressão de pré-consolidação (σ_p).

Como a avaliação foi realizada com o teor de água de campo (praticamente igual para todos), os tratamentos serão discutidos pela densidade. A partir da curva da tensão de pré-consolidação, como função da densidade (Figura 11), notou-se uma variabilidade, mas isto não permite chegar às conclusões concretas, em função da quantidade de amostras (repetições).

Vários autores têm determinado as relações entre a umidade do solo e a tensão de pré-consolidação, obtendo uma curva que pode auxiliar nas operações com máquinas agrícolas, evitando compactação adicional por exceder a tensão de pré-consolidação (Dias Junior, 2000; Imhoff, 2002).

O conhecimento do índice de compressibilidade (IC) possibilita prever mudanças na relação ar-água-matriz ao exercer uma determinada pressão externa ao solo e, por sua vez, condições mais apropriadas ao crescimento das plantas (Braidá, 2004). Considera-se o IC como a facilidade com que um determinado solo diminui seu espaço aéreo quando submetido a um aumento de pressão aplicada e umidade, menores níveis de compactação condicionarão maior suscetibilidade do solo à degradação estrutural nos sistemas.

Observou-se diferenças entre algumas das variáveis analisadas, o que cumpre com as hipóteses do estudo. Para isso discutir-se-á as variáveis Densidade do solo (Ds), Pressão de pré-consolidação (σ_p), Coeficiente de compressibilidade (IC) e Índice de relaxamento (IR) com mais detalhes nos próximos parágrafos, dando ênfase às suas relações com densidade, o grau de saturação e o teor de água nas duas profundidades.

4.5.2. Densidade do solo

De forma geral observou-se que a densidade foi menor na camada superficial do solo em todos os preparos, mas aumentou na camada de 10 a 20 cm. A menor densidade do solo (Ds) foi observada no sistema plantio convencional e foi semelhante à do plantio reduzido. Segundo Arvidsson (1998), a matéria orgânica diminui a

densidade e o grau de compactação e, assim, era de se esperar que o plantio direto, por ter maior teor de matéria orgânica e não haver revolvimento do solo deveria apresentar uma menor densidade, o que não ocorreu. Em contrapartida, Seixas et al. (2005), afirmam que, no PD, em função do não revolvimento do solo e após os primeiros anos de implantação, pode ocorrer um aumento da densidade na camada superficial diminuindo a porosidade, o que implica menores taxas de permeabilidade. Porém, se o sistema for corretamente manejado, com boa cobertura morta e adequada rotação de culturas irá promover uma melhor estruturação do solo, com canais que permitem adequado fluxo de ar e maiores taxas de infiltração de água.

A densidade do solo geralmente aumenta com o aumento da profundidade, pois as camadas superiores sobre as subjacentes provocam o fenômeno da compactação, reduzindo a porosidade do solo (Camponez do Brasil, 2000), além de haver um menor conteúdo de matéria orgânica nas camadas inferiores e uma menor agregação e penetração das raízes. Para o caso do PD, também deve-se considerar que a densidade pode sofrer alterações devido ao revolvimento inicial quando se tem um sistema de produção. No caso, isso não ocorreu, pois os tratamentos PD foram implantados diretamente sobre CN dessecado. No entanto, deve ser levada em consideração a mobilização causada pelos sulcadores na linha de semeadura, o que pode alterar a densidade do solo na camada mais superficial (0 a 13 cm, profundidade do sulcador). No caso deste trabalho, porém, pode ter interferido o pequeno número das amostras coletadas em cada tratamento.

Pode-se dizer que o efeito do revolvimento do solo se torna evidente ao observar as densidades no tratamento PC, pois à medida que aumenta a profundidade, a densidade aumenta, deixando evidente o efeito do revolvimento nas camadas mais superficiais. Esse aumento de densidade com o aumento da profundidade pode ser explicado também pelo aumento do teor de argila nessas camadas, já que a argila pode ocupar os poros e reduzir a porosidade.

Na Tabela 4 constam valores da densidade do solo dos três sistemas de preparo do solo, nos diferentes manejos de culturas, adubação e irrigação.

TABELA 4. Valores da densidade nos diferentes manejos.

Bloco/manejo	Preparo	Ds (Mg m^{-3})			MO (%)		
		Profundidade (cm)			Profundidade (cm)		
		0-10	10-20	Média	0-10	10-20	Média
I - (AMI)-Rotação	PD	1,59	1,62	1,60	3,4	2,4	2,9
	PR	1,51	1,61	1,56	2,6	2,3	2,5
	PC	1,44	1,7	1,57	2,9	2,6	2,7
II - (AMI)- Sucessão	PD	1,66	1,7	1,68	3,4	2,9	3,1
	PR	1,52	1,41	1,46	3,6	2,9	3,2
	PC	1,58	1,6	1,59	3,1	2,9	3,0
III - (AM) Pousio	PD	1,58	1,64	1,61	3,4	2,8	3,1
	PR	1,38	1,51	1,44	3,9	2,5	3,2
	PC	1,52	1,57	1,54	3,2	2,7	2,9
IV - (AO) - Sucessão	PD	1,58	1,67	1,62	4,5	2,5	3,5
	PR	1,52	1,46	1,49	4,1	2,5	3,3
	PC	1,44	1,63	1,53	3,3	2,7	3,0
V - (AM) - Rotação	PD	1,52	1,72	1,62	3,6	2,5	3,0
	PR	1,6	1,61	1,60	2,8	2,6	2,7
	PC	1,4	1,68	1,54	2,9	1,6	2,2
VI - (AM) - Sucessão	PD	1,52	1,66	1,59	3,8	2,4	3,1
	PR	1,38	1,47	1,42	3,4	2,5	2,9
	PC	1,39	1,66	1,52	3,1	3,0	3,0
VIII - (AO) - Rotação	PD	1,5	1,69	1,59	4,4	2,6	3,5
	PR	1,46	1,41	1,43	4,6	2,7	3,6
	PC	1,48	1,65	1,56	3,9	3,4	3,6
VII - Campo Nativo	CN	1,70	1,70	1,70	4,6	3,2	3,9

PD: plantio direto; PR: preparo reduzido; PC: preparo convencional; AMI: adubação mineral irrigado; AM: adubação mineral; AO: adubação orgânica

Medina (1985), assim como Corsini & Ferraudo (1999), estabeleceram os valores críticos ao desenvolvimento radicular em solos. Para solos arenosos, o limite é de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos. Tratando-se de um solo argiloso arenoso, este limite crítico se situa em torno de $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$. Verificando os valores apresentados na Tabela 4, o PD e o CN apresentam valores acima do limite, na camada de 10 a 20 cm, como foi mencionado antes, o tráfego de maquinarias agrícolas constitui uma das principais causas. Nos demais casos, a densidade comportou-se dentro dos limites, o que implica que, nas áreas em estudo, a densidade não seria restritiva ao desenvolvimento das plantas.

Se a densidade aumentou no PD e no CN, pode-se inferir que a porosidade total diminuiu. Este fato pode ser justificado pela ocupação dos poros por argilas, como foi mencionado anteriormente. Qualquer alteração na estrutura original do solo, seja pelo manejo incorreto durante o uso agrícola, pisoteio de animais, por exemplo, ou por qualquer outra força externa, irá provocar diminuição do espaço poroso (Pena et al., 1996).

Na Tabela 5 pode ser observado que a densidade do solo, nos tratamentos PC e PD, aumentou na camada de 10 a 20 cm em relação à camada superficial. O PR manteve valores semelhantes nas duas camadas, demonstrando eficiência na mobilização efetuada pelo escarificador. O tratamento PD teve valores de densidade levemente maiores aos do PC e PR, nas duas camadas avaliadas, mas na camada de 0 a 10 cm nota-se que o valor da densidade do PR é intermédio do PD e PC.

TABELA 5. Efeitos dos sistemas de preparos sobre a densidade do solo (Mg m^{-3}) em duas profundidades (cm).

Preparo	Profundidades		Média
	0 -10 cm	10-20 cm	
PD	1,57Ab	1,67Aa	1,62
PR	1,48ABa	1,50Ba	1,49
PC	1,47Bb	1,64Aa	1,56
Média	1,50	1,60	

PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido e PD= plantio direto. Letras minúsculas diferentes na linha e maiúsculas na coluna indicam diferenças significativas

É necessário salientar que a aração não foi até os 25 cm. Na Tabela 5 notou-se que o PD e o PC apresentaram valores de densidade maiores comparados ao do PR. Este fato pode ser argumentado pela falta de revolvimento além do tráfego de máquinas e implementos agrícolas que provocam acúmulo de pressões no caso do PD; em compensação, no PC, provavelmente seja pelo fato do excesso de revolvimento, que pulveriza e compacta a camada arável do solo.

4.5.3. Pressão de pré-consolidação

A pressão de pré-consolidação (Tabela 6) apresentou diferença significativa entre os preparos, sendo, na média, maior no PD, intermediário no PC e menor no PR e foi, na média, maior na camada de 10-20 cm.

De forma geral, a pressão de pré-consolidação se torna menor à medida que aumenta a umidade do solo, considerando que a água é um fator determinante sobre a resistência do solo porque diminui a coesão entre as partículas sólidas e forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre as mesmas (Hillel, 1980). A pressão de pré-consolidação resulta ser reduzida, como foi descrito por Dias Junior (1994), Kondo & Dias Junior (1999) e Silva et al. (2000), que observaram um decréscimo exponencial da pressão de pré-consolidação com o aumento do teor de água no solo.

TABELA 6. Efeitos dos sistemas de preparos sobre a pressão de pré-consolidação (kPa) nas duas profundidades (cm).

Preparo	Profundidades		Média
	0-10cm	10-20cm	
PD	74,46	94,18	84,32 A
PR	54,44	59,00	56,72 C
PC	53,30	90,54	71,92 B
Média	60,73 b	81,24 a	

PD= plantio direto; PR= preparo reduzido e PC= preparo convencional. Letras minúsculas diferentes na linha e maiúsculas na coluna indicam diferença estatística.

Para a avaliação da pressão de pré-consolidação como função da umidade, as amostras foram analisadas conforme os sistemas de preparo do solo, e notou-se que o campo nativo apresentou maior pressão de pré-consolidação, seguido pelo preparo direto, preparo convencional e, por último, o preparo reduzido. Mas é importante destacar que as diferenças entre o preparo direto e o convencional são menores, conforme a Figura 8.

Isto pode ser justificado pelo fato do PD e CN apresentarem maiores densidades.

Neste solo, observou-se que a pressão de pré-consolidação é maior quanto maior for a densidade do solo (Figura 9), valores destacados na Tabela 3. Este tema será verificado no estudo dois, com o ensaio de Proctor, onde definir-se-á a umidade crítica de compactação, assim como a densidade máxima. Carpenedo (1994), determinou que a maioria das pressões médias aplicadas sobre a superfície do solo por tratores e colheitadeiras oscilam entre 100 e 200 kPa. Por esse motivo, quando determinar a umidade crítica de compactação no teste Proctor, esta não pode ser o valor limite definidor do momento apropriado de entrada de maquinarias na lavoura.

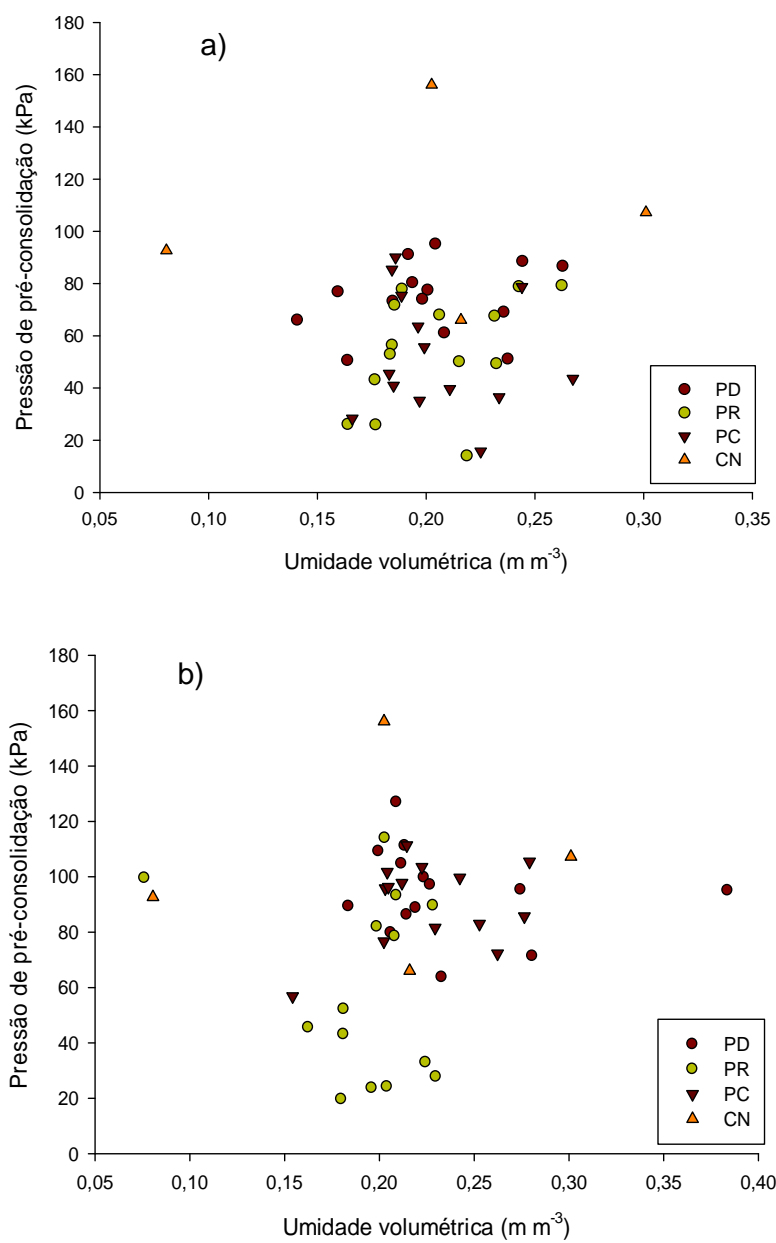


FIGURA 8. Pressão de pré-consolidação como função da umidade volumétrica do solo nos sistemas de preparo do solo nas profundidades de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b).

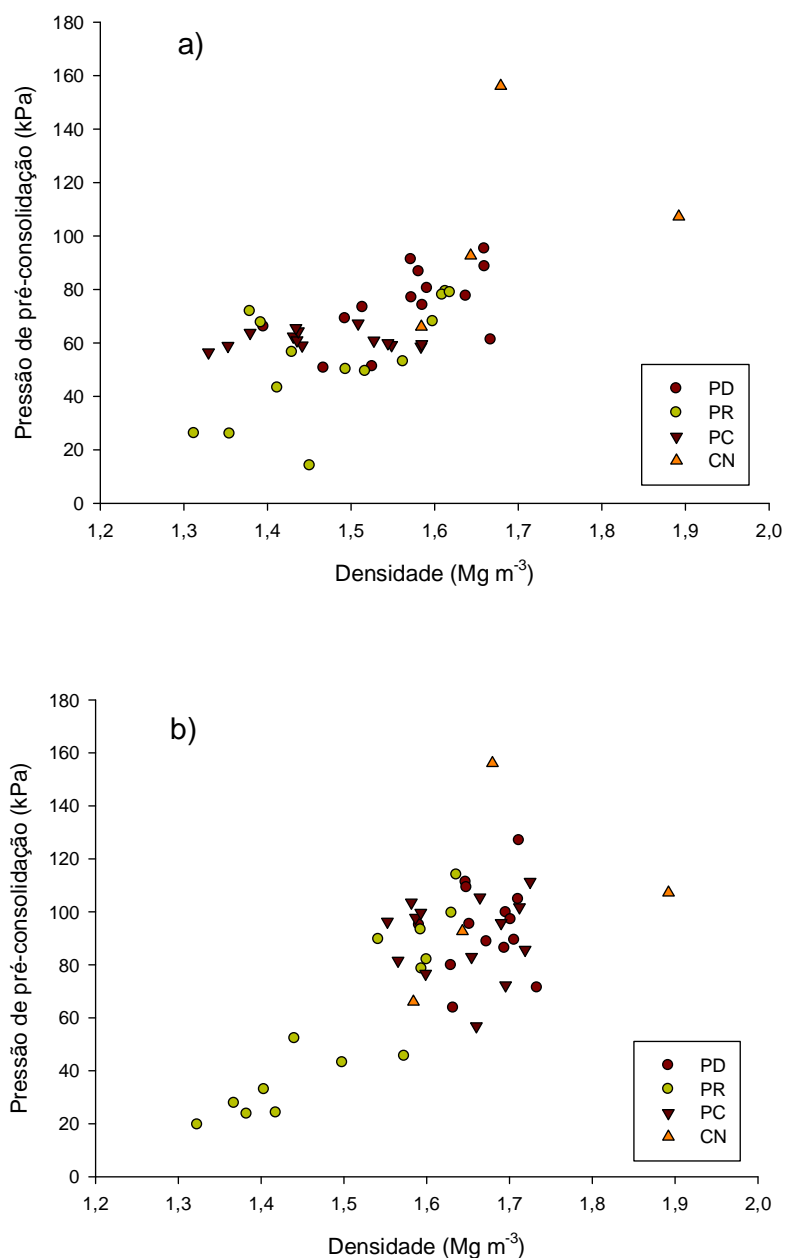


FIGURA 9. Pressão de pré-consolidação como função da densidade do solo nos sistemas de preparo do solo na profundidade de 0 a 10 cm(a) e de 10 a 20 cm (b).

Na Figura 10 mostra-se a avaliação da σ_p com relação ao grau de saturação das amostras. De forma geral, observou-se que a tendência é semelhante ao caso anterior, ou seja, a pressão de pré-consolidação varia da seguinte ordem crescente: PR<PC<PD<CN. A σ_p foi maior nos sistemas de preparo mais densos porque a resistência à deformação é resultante do número de pontos de contato. Não obstante, quanto mais compacto o solo estiver, maior é o número de pontos de contato e, assim, maior é a resistência.

Também é de salientar que o efeito da água sobre a resistência do solo é oriundo de seus efeitos sobre a coesão e o atrito entre as partículas sólidas. Assim, em dois solos com o mesmo grau de saturação, apresentaria menor quantidade de água aquele com maior densidade. Observou-se a maior σ_p no PD e no CN, devido ao menor conteúdo de água existente nos solos sob estes preparos no dia da coleta das amostras. Portanto, para este solo, a σ_p é maior em saturações baixas, quanto maior for a densidade do solo. Neste tipo de solo, a resistência à deformação é determinada principalmente pelo número de pontos de contato e pelo o atrito entre as partículas. Então quando há suficiente água para reduzir o atrito entre as mesmas, ou para diluir a pouca coesão existente, a capacidade de suporte torna-se independente da densidade inicial.

Também se deve considerar o efeito da matéria orgânica sobre a coesão e retenção e movimentação de água no solo. Nos Argissolos, o teor de carbono orgânico tem um efeito contraditório, já que este tem um efeito sobre a densidade, ou seja, tende a diminuir a densidade, resultando assim na redução da σ_p , pois a redução da densidade significa redução do número de pontos de contato entre as partículas e, portanto, da resistência à deformação.

O aumento da σ_p em função do incremento do teor da matéria orgânica, no PD e CN, deve-se, provavelmente, ao efeito da MOS sobre a consistência do solo. Os incrementos de MOS resultam em incrementos dos limites de consistência, pois a matéria orgânica constitui-se na primeira demanda pela água adicionada ao solo (Stone & Ekwue, 1993). Dessa forma, quanto maior o teor de matéria orgânica, maior será o teor de água para que a mesma atue efetivamente na redução da coesão e do atrito entre as partículas minerais, justificando assim o porquê dos maiores valores de σ_p para solos mais ricos em MO, para uma mesma umidade.

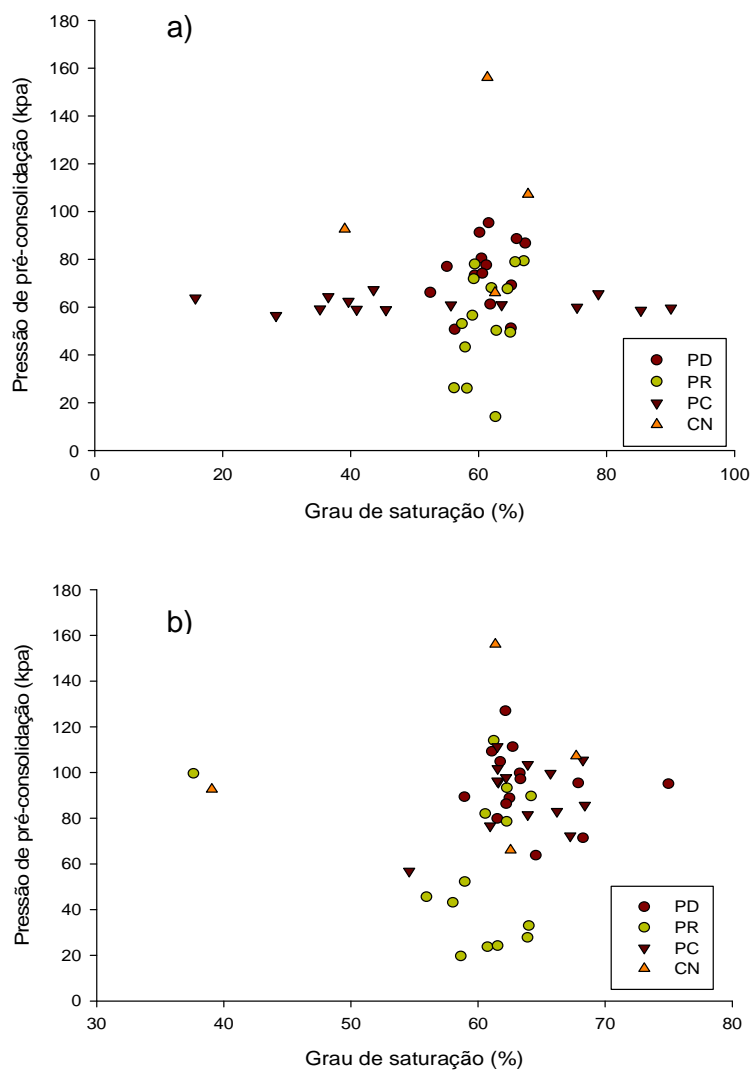


FIGURA 10. Pressão de pré-consolidação como função do grau de saturação do solo nos sistemas de preparo na profundidade de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b).

4.5.4. Índice de compressibilidade do solo

Os sistemas de preparo do solo produziram variação significativa sobre o índice de compressibilidade do solo, sendo que se observou a maior compressibilidade no sistema PR (Tabela 7).

TABELA 7. Efeitos dos sistemas de preparo do solo sobre o índice de compressibilidade do solo (IC).

Preparo	Profundidades		Média
	0-10cm	10-20cm	
PD	0,22	0,21	0,22 B
PR	0,24	0,26	0,25 A
PC	0,26	0,23	0,25 A
Média	0,24 a	0,23 a	

PD= plantio direto; PR= preparo reduzido e PC= preparo convencional. Letras minúsculas diferentes na linha e maiúsculas na coluna indicam diferença estatística

De maneira geral, observou-se que, quanto mais denso o solo, menor é o índice de compressibilidade (IC) em um mesmo teor de água. A Figura 11 mostra o contrário do ocorrido nas Figuras 8, 9 e 10, nas quais os símbolos representando os preparos com solos mais densos (PD e CN) estão nas posições mais altas. Mas apesar da tendência invertida, na camada de 0 a 10 cm, fora do PC, o resto dos preparos (PR e PD) mais a referência (CN), são quase semelhantes porque custa dissecá-los, e na camada de 10 a 20 cm o PR apresenta maior índice de compressibilidade enquanto o resto se assemelha. Isto acontece, provavelmente, porque o efeito da matéria orgânica sobre a resistência do solo é dependente de seus efeitos conjuntos sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água (Zhang et al., 1997).

A compressibilidade cresce com o aumento da umidade porque a água reduz a coesão e o atrito entre as partículas sólidas e, depois de atingir um valor máximo, decresce porque o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e, assim, a deformação acontece somente com a expulsão da água do meio poroso. Portanto, nesse caso, a compressibilidade é determinada pela condutividade hidráulica do solo.

Geralmente para os solos de maior densidade, o incremento de MOS implica decréscimo do IC. Deve-se lembrar que a resistência do solo à deformação depende do número de pontos de contato entre as partículas sólidas e da resistência desses pontos de contato (Horn & Lebert, 1994). Assim para o PR que é menos denso, a porosidade do solo pode estar sendo o fator principal na resistência à compactação, porque uma maior porosidade implica um menor número de pontos de contato entre as partículas minerais.

Nos preparos com solo mais denso, o aumento da MOS resultou na redução do índice de compressibilidade do solo, comportamento que pode ser justificado pela capacidade da MO em estabelecer e fortalecer ligações entre as partículas minerais em

função de sua elevada ASE. Assim, o aumento da MOS resulta no aumento da retenção de água, reduzindo assim a compressibilidade por aumentar o grau de saturação do solo levando-o a ter a compressibilidade limitada pela condutividade hidráulica.

Outro aspecto que se pode atribuir à redução do índice de compressibilidade nos preparos, seria o aumento da densidade do solo relacionado ao efeito da MOS. Mesmo não sendo o efeito esperado da MOS, mas isso justificaria porque a maioria das amostras mais densas são do PD, que se aproximam muito às amostras do CN (Tabela 3), sistemas sem revolvimento do solo, fator que permite o acúmulo de MO, que muitas vezes, causa o aumento da densidade do solo.

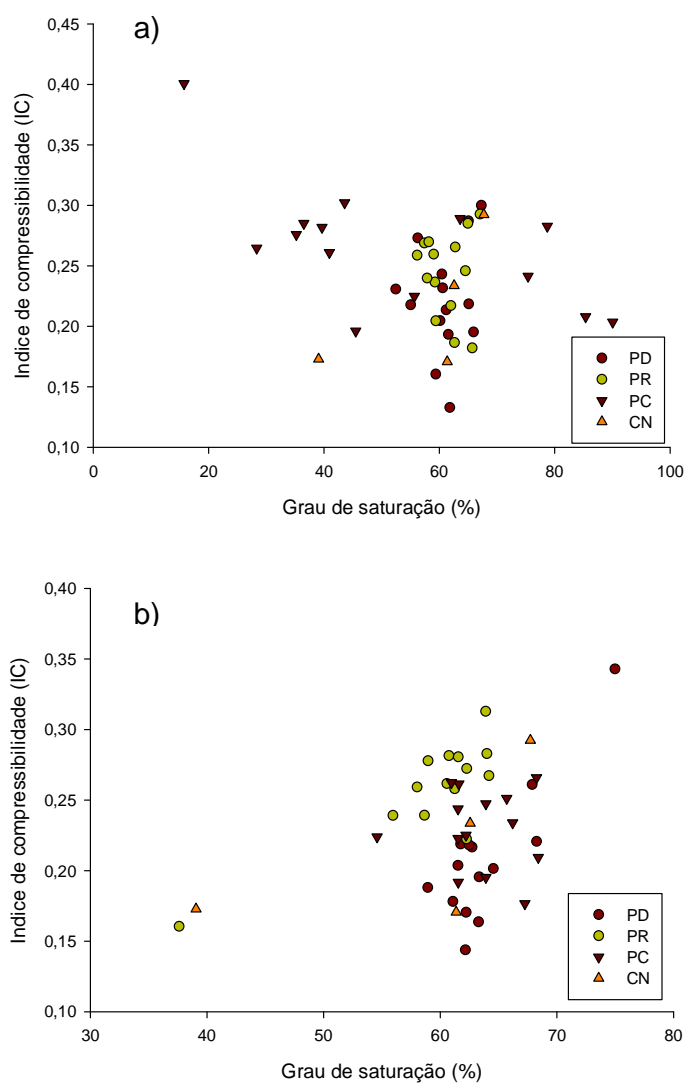


FIGURA 11. Índice de compressibilidade (IC) como função do grau de saturação do solo para sistemas de preparo na profundidade de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b).

4.5.5. Índice de relaxamento (IR)

Este índice fornece indicativo da capacidade do solo recuperar sua forma anterior após uma compressão, ou seja, elasticidade do solo ou “rebound”. Na Tabela 8, pode ser verificado que os sistemas de preparo não tiveram efeitos sobre este coeficiente, pois não foram verificadas diferenças entre os preparos de solo, mas em compensação houve diferenças entre as médias dos três preparos nas duas profundidades estudadas.

De forma geral, o índice de relaxamento (IR) apresentou uma tendência similar à do índice de compressibilidade (IC) (Tabela 11 e Figura 11), característica bem acentuada na camada de 0 a 10 cm, onde o PR e PC apresentam maiores índices de relaxamento e na camada de 10 a 20 cm o PD e CN apresentaram valores semelhantes (Tabela 8 e Figura 12). Semelhanças que podem ser justificadas pela presença de MOS ou pelo fato deste índice ser dependente da elasticidade do material que compõe o solo e também do aprisionamento de bolhas de ar comprimido que se expandem quando cessa a aplicação de pressão.

TABELA 8. Efeitos dos sistemas de preparo do solo e profundidade de amostragem sobre Índice de relaxamento do solo (IR).

Preparo	Profundidades		Média
	0-10 cm	10-20cm	
PD	0,05	0,03	0,04 A
PR	0,06	0,06	0,06A
PC	0,07	0,03	0,05A
Média	0,06 a	0,039 b	

PD= plantio direto; PR= preparo reduzido e PC= preparo convencional. Letras minúsculas diferentes na linha e maiúsculas na coluna indicam diferença estatística

O material orgânico, sendo mais flexível que a parte mineral tem uma grande capacidade de recuperação da forma após a remoção de uma carga aplicada sobre ele (Soane, 1990). Essas características permitiriam que as partículas orgânicas, que ligam partículas minerais, sejam deformadas quando as partículas minerais são deslocadas durante a aplicação de uma carga, sem que as ligações se rompam totalmente. Ao cessar a aplicação da carga, as partículas orgânicas tenderiam a retornar à forma original.

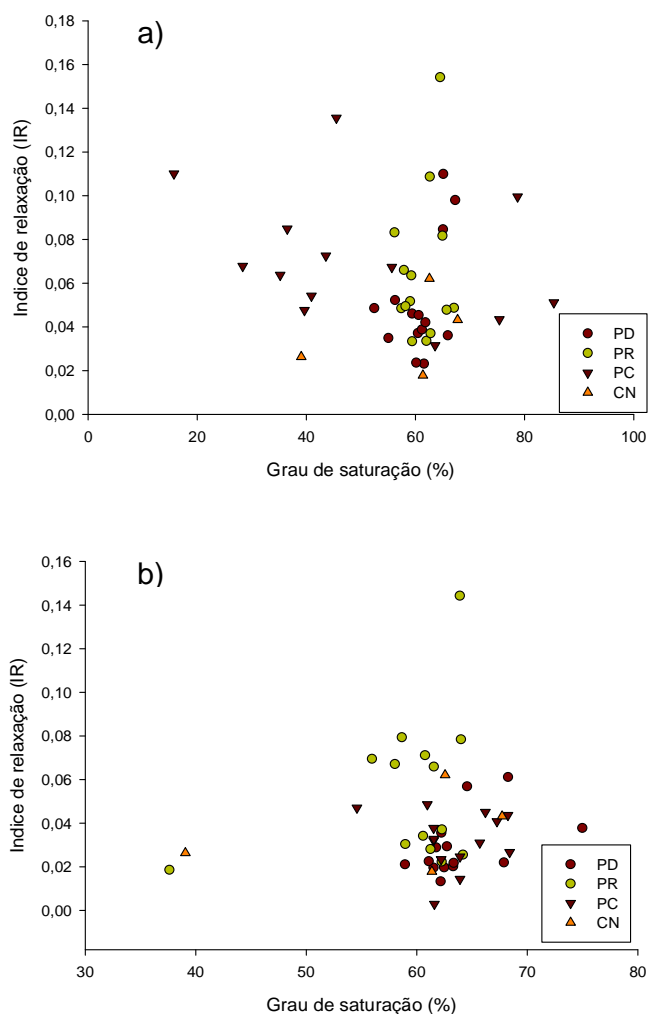


FIGURA 12. Índice de relaxamento (IR) como função do grau de saturação do solo nos quatro sistemas de preparo na profundidade de 0 a 10 cm (a) e de 10 a 20 cm (b).

De maneira geral, a redução da densidade do solo após a remoção das cargas aplicadas foi sensivelmente afetada pela variação do teor de MOS, assim como, pela umidade e pela densidade.

Após avaliar os efeitos dos sistemas de preparo do solo sobre D_s , IC , IR , σ_p e outras variáveis, analisou-se também os efeitos dos manejos e profundidades sobre as mesmas, cujas médias constam na Tabela 9.

TABELA 9. Efeitos dos manejos sobre os atributos físicos Ds (densidade do solo), MO (matéria orgânica), IC (índice de compressibilidade), IR (índice de relaxamento) e σ_p (pressão de pré-consolidação), nas camadas de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm.

Manejos	Atributos físicos do solo				
	Ds (Mg m ⁻³)	MO (%)	IC	IR	σ_p (kPa)
	0 – 10 cm				
PD (AM)	1,54	3,6	0,25	0,052	73,1
PD(AMI)	1,63	3,4	0,17*	0,037	79,6
PD(AO)	1,54	4,5	0,24	0,066	71,4
PR(AM)	1,46	3,4	0,24	0,082	54,5
PR(AMI)	1,52	3,1	0,22	0,050	64,1
PR(AO)	1,48	4,4	0,27	0,054	44,7
PC(AM)	1,44	3,1	0,30	0,069	33,9
PC(AMI)	1,51	3,0	0,21*	0,068	69,2*
PC(AO)	1,46	3,6	0,28	0,065	63,6

10 – 20 cm					
PD (AM)	1,7	2,6	0,22	0,031	91,9
PD(AMI)	1,7	2,7	0,21	0,023	107,7
PD(AO)	1,7	2,6	0,19	0,032	84,1
PR(AM)	1,5	2,5	0,27	0,051	73,1
PR(AMI)	1,5	2,6	0,23	0,052	61,1
PR(AO)	1,4	2,6	0,28	0,061	42,6
PC(AM)	1,6	2,5	0,22	0,030	95,3
PC(AMI)	1,7	2,8	0,23	0,030	94,2
PC(AO)	1,6	3,1	0,24	0,038	79,7

AM= adubação mineral; AMI= adubação mineral irrigação e AO= adubação orgânica

PD= preparo direto; PR= preparo reduzido e PC= plantio convencional

* P<0,05

** P<0,01

Não foram observadas diferenças na maioria delas. Após o teste ANOVA, notou-se que não houve variações no sistema plantio reduzido e no PC houve variação da pressão de pré-consolidação e do índice de compressibilidade na camada de 0 a 10 cm e no PD o índice de compressibilidade apresentou variação na profundidade de 0 a 10 cm e o grau de saturação final na camada de 10 a 20 cm. As médias das variáveis estão listadas na Tabela 9. Essas tabelas permitem ao pesquisador fazer uso do seu bom senso porque este pode analisar e ter uma idéia clara, assim, antes mesmo da estatística notou-se que não houve diferenças no PR mas no PC e PD a Adubação Mineral Irrigado teve efeito na camada de 0 a 10 cm. Comportamento que pode ser justificado, retomando a presença da MOS, cujo teor é alto na camada de 0 a 10 cm onde a diferença de teor desta constitui uma diferença nos preparos, quer dizer alto teor de MO

aumenta o valor da pressão de pré-consolidação mas diminui o índice de compressibilidade (Tabela 9). Na mesma tabela pode-se observar que, com o aumento da profundidade, os teores de MO decresceram em todos os tratamentos. No solo sob plantio direto este decréscimo foi mais evidente, seguido pelo campo nativo. Este resultado era esperado uma vez que o maior acúmulo de carbono no sistema de plantio direto ocorre na superfície (Lopes et al., 2004).

Na Tabela 10 é possível verificar os resultados da análise estatística do efeito dos manejos sobre as medias de cada uma das variáveis ou coeficientes analisados.

Dos resultados obtidos, comparou-se as médias pelo teste de Tukey, considerando todos os manejos e profundidades como repetições, notou-se uma variação do índice de compressibilidade nas duas camadas. As variáveis analisadas neste estudo mostraram variações nos diferentes manejos, embora, em algumas, não se observou diferenças significativas entre a Adubação Mineral com a Adubação Mineral Irrigado e ainda mais, não se observou diferenças estatísticas, pelo critério ou bom senso do pesquisador pode-se dizer que a densidade do solo, a pressão de pré-consolidação foram superiores no PD, nos tratamentos com adubação mineral + irrigação, o que indica que a irrigação traz melhoria, comparado aos demais manejos (Tabelas 9 e 10).

Os altos valores da densidade do solo em sistema de semeadura direta deveram-se ao tráfego de maquinarias agrícolas muitas vezes em condições inadequadas e também pelo processo de reconsolidação do solo nesse período, dada à ausência do revolvimento. Desta forma, pode-se dizer que os menores valores de densidade, observados no PR e PC com adubação mineral e adubação mineral + irrigação, foram proporcionados pelo efeito do revolvimento, aos quais esses solos foram submetidos.

Para encerrar com a análise dos efeitos dos diferentes manejos sobre as propriedades físicas do solo, na Tabela 11, pode-se notar que não houve diferença significativa nos valores do IC, entre os manejos AM e AO também não se observou diferenças dos mesmos nas duas profundidades, mas os valores do IC obtidos nos dois manejos anteriores foram estatisticamente diferentes dos do manejo AMI, que apresentou menores valores. De forma geral, em cada manejo, o IC se comportou de igual maneira nas duas profundidades. A compressibilidade decresce sempre com o aumento da umidade, considerando que o efeito da MOS sobre a compressibilidade seja o resultado de seus efeitos sobre a retenção de água. Portanto, o aumento do teor de MOS, pode resultar em aumentar a retenção de água no solo.

TABELA 10. Efeito dos diferentes preparos e manejos sobre IC (índice de compressibilidade) e σ_p (pressão de pré-consolidação), em diferentes profundidades.

Preparo	Prof.	Manejos	IC		σ_p (kPa)	
PD	0-10	AM	0,246	A	73,1	A
		AMI	0,170	B	79,6	A
		AO	0,235	A	71,4	A
	10-20	AM	0,223	A	91,9	A
		AMI	0,207	A	107,7	A
		AO	0,189	A	84,1	A
PR	0-10	AM	0,240	A	54,5	A
		AMI	0,221	A	64,1	A
		AO	0,272	A	44,7	A
	10-20	AM	0,264	A	68,5	A
		AMI	0,230	A	61,1	A
		AO	0,278	A	42,6	A
PC	0-10	AM	0,298	A	33,9	B
		AMI	0,208	B	72,2	A
		AO	0,275	AB	63,6	AB
	10-20	AM	0,222	A	95,3	A
		AMI	0,233	A	94,2	A
		AO	0,237	A	79,7	A

AM= adubação mineral; AMI= adubação mineral irrigação e AO= adubação orgânica

PD= preparo direto; PR= preparo reduzido e PC= plantio convencional

Médias seguidas da mesma letra na coluna são estatisticamente iguais pelo teste DMS com 5% de significância.

TABELA 11. Efeito dos diferentes manejos do solo, nas profundidades de amostragem, sobre IC (índice de compressibilidade do solo).

Tratamentos	IC (0-10 cm)	IC (10-20 cm)
AM	0,261 A	0,249 A
AO	0,261 A	0,248 A
AMI	0,200 B	0,212 B

AM= adubação mineral; AMI= adubação mineral irrigação e AO= adubação orgânica

Médias seguidas da mesma letra na coluna são estatisticamente iguais pelo teste DMS com 1% de significância.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os preparos do solo têm uma grande influência nas alterações e diferenças nos valores da pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e do índice de relaxamento.

Os preparos sem revolvimento do solo apresentaram maior pressão de pré-consolidação.

O acúmulo de matéria orgânica nos sistemas de preparo sem revolvimento tem uma relação proporcional com a pressão de pré-consolidação e inversamente proporcional ao índice de compressibilidade.

5. Estudo II: COMPACTAÇÃO MÁXIMA E RELATIVA DO SOLO COM O ENSAIO DE PROCTOR

5.1. INTRODUÇÃO

A compactação é definida por Hillel (1982) como sendo o processo de redução de volume (compressão) de um solo não saturado por causas de natureza antropogênica, o qual se encontra relacionado à expulsão de ar. Segundo o autor, a compressão de um solo saturado é denominada consolidação, e envolve a saída de água. Assim, a velocidade com a qual um solo se compacta ou consolida depende da permeabilidade do mesmo à água e ao ar.

Segundo Imhoff (2002), existem diversos indicadores do estado de compactação do solo, sendo a densidade e a resistência mecânica à penetração os mais usados (Raper, 2005). Uma das grandes vantagens do uso da densidade do solo como indicador do estado de compactação é sua independência em relação ao teor de água durante a avaliação. No entanto, são necessárias diversas amostragens para que as diferenças significativas nesta variável sejam detectadas (Chancellor, 1994). Além disso, o método padrão para quantificação da densidade do solo, que envolve a coleta de amostras indeformadas através de anéis volumétricos (EMBRAPA, 1997), é trabalhoso, demorado e destrutivo.

O estabelecimento dos valores de densidade do solo ao desenvolvimento das plantas não é tarefa fácil, especialmente quando se considera que, conforme Hakansson & Lipiec (2000), a resposta das culturas a este atributo varia de solo para solo, principalmente em função da textura, o que dificulta a extrapolação dos resultados experimentais. Baseado em estudos relacionados ao IHO, Reichert et al. (2003) sugerem valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas, os quais variam em função da classe textural do solo. De acordo com estes autores, os valores de densidade limitantes às plantas correspondem em média a 1,75; 1,45 e 1,30 Mg m⁻³ para solos de textura arenosa, média e muito argila, respectivamente.

Para reduzir as diferenças de respostas das plantas à densidade em função do tipo de solo, Hakansson (1990) propôs o conceito de densidade relativa, determinada

pela divisão da densidade do solo por um valor de densidade de referência obtido pela compressão uniaxial de amostras grandes e indeformadas de solo a uma tensão de 200 kPa. O autor, tendo como base os resultados de mais de 100 experimentos em diferentes tipos de solos, concluiu que a densidade relativa ótima à produtividade de diversas culturas corresponde aproximadamente a 0,87. No Brasil, tem-se utilizado como referência a densidade máxima determinada pelo teste de Proctor Normal (Klein, 2006) que, na maioria dos casos, resulta em valores de densidade relativa ótima semelhantes (Torres & Saraiva, 1999; Beutler et al., 2005) aos indicados por Hakansson (1990).

Assim, a suscetibilidade à compactação de um solo pode ser avaliada com o ensaio de Proctor Normal ou suas variantes. Esse ensaio foi desenvolvido pela engenharia civil para determinar a umidade adequada para obter a máxima compactação do solo na construção de estradas (Vargas, 1977), ou seja, a umidade em que o solo está mais suscetível à compactação. No ensaio Proctor, para uma mesma energia de compactação, a densidade obtida depende da umidade do solo, sendo que a densidade cresce com o aumento da umidade até um determinado valor e depois torna-se decrescente. Esse comportamento ocorre porque, em umidades baixas, a adição de água cria filmes de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas, facilitando a compactação.

A partir de uma dada umidade, em que a compactação é máxima, a adição de mais água resulta em que a mesma venha a ocupar os espaços existentes entre as partículas do solo, o que produz o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos suscetível à compactação (Ohu et al., 1989). Assim, compactando-se o solo em vários teores de água, mas sempre com a mesma energia, e relacionando os valores de densidade obtidos com esses teores, se obtém uma curva de compactação do solo, da qual se pode calcular sua densidade máxima e o teor de água em que essa ocorre.

A curva de compactação do solo é influenciada por vários fatores, tais como energia de compactação, textura, mineralogia e teor de matéria orgânica (Silva et al., 1986; Ohu et al., 1989; Ekwue & Stone, 1997), mas, de maneira geral, seu formato é semelhante para todos os solos. A suscetibilidade à compactação, avaliada pelo ensaio Proctor, normalmente é menor quanto maior for a quantidade de material orgânico existente no solo. Em geral, se observa que para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é a densidade máxima obtida e maior é o teor de água necessário para atingi-la. Isso foi observado em estudos com um mesmo solo, porém com diferentes teores de matéria orgânica (Ball et al., 2000; Aragón et al.,

2000), com diferentes solos de mesma textura e com teores de matéria orgânica diferentes (Silva et al., 1986) e com adição de material orgânico semi-decomposto ao solo (Stone & Ekwue, 1993; Zhang et al., 1997). Segundo os autores, isso ocorre pelas seguintes razões: a) o efeito amortecedor da matéria orgânica, que resulta em dissipação de parte da energia aplicada; b) capacidade de retenção da água pela matéria orgânica, que, ao retê-la junto de suas partículas, impede que a mesma atue como lubrificante entre as partículas minerais; c) capacidade da matéria orgânica em estabelecer ligações entre as partículas do solo, aumentando a coesão entre as mesmas; e, d) baixa densidade da matéria orgânica, assim quando aumenta o teor de matéria orgânica, reduz a densidade da mistura solo e matéria orgânica.

Considerando que o ensaio Proctor é pouco usual nos laboratórios de análises de solo para fins agrícolas e, ainda que o mesmo exija uma amostra relativamente grande de solo (cerca de 10 kg), vários autores têm sugerido índices alternativos para determinar o teor de água ou umidade crítica de compactação. Assim, Ojeniyi & Dexter (1979) sugerem que seja utilizada a umidade correspondente a 90% do limite de plasticidade, o que foi corroborado pelas observações de Figueiredo et al. (2000).

A sustentabilidade do solo a uma compactação está na definição de quando o solo está com um teor de água adequada para realizar operações com máquinas agrícolas, e estimar o quanto de deformação ocorrerá nele quando são aplicadas cargas superiores à capacidade de suporte do solo (Dias Junior & Pierce, 1996).

No estudo para fins agrícolas, a densidade máxima é a densidade crítica, ou seja, o momento no qual o solo apresenta uma umidade que não permite a trafegabilidade das máquinas agrícolas, nem realizar pastoreio. Klein et al. (2004) observaram que a densidade relativa ou grau de compactação do solo depende do manejo e é um bom parâmetro para indicar a qualidade física do solo.

Assim, este trabalho foi realizado com o objetivo de obter a densidade referência para determinar o grau de compactação do solo em diversos sistemas de manejo do solo e métodos de preparo efetuados nos mesmos.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se amostras obtidas nas mesmas parcelas descritas no estudo I, conduzido sobre um Argissolo Vermelho Distrófico típico. Algumas características das camadas amostradas são apresentadas na Tabela 3, no capítulo I.

As amostras foram coletadas em maio de 2008, nos oito blocos do experimento, e nos diferentes preparos de solo, na profundidade de 0 a 20 cm. Nos tratamentos com Plantio Direto (PD) foram coletadas amostras em duas profundidades: 0 a 10 cm e 10 a 20 cm. Depois de coletado o solo (em torno de 20 kg cada amostra), o mesmo foi levado ao laboratório, onde foi destorroado, seco ao ar e peneirado (peneira n.4 da USB). Após a secagem, cada amostra foi dividida em cinco sub-amostras de 2,5 kg, totalizando 145 amostras.

5.2.1. Ensaio de Proctor

O ensaio de Proctor normal consiste na compactação do solo, utilizando-se um ensaio padrão normalizado pela Norma Técnica ABNT/NBR 7182 MB 33. A curva de compactação é obtida compactando-se uma amostra de solo em três camadas com 5 ou 6 teores de água, com intervalos de 2 % entre pontos, de forma que o terceiro ponto seja o mais próximo do teor de água ou umidade ótima ou crítica. Para este estudo, foram definidos cinco pontos com os seguintes valores de teor de água do solo: 0,09; 0,11; 0,13; 0,15 e 0,17 g g⁻¹.

O ensaio foi realizado em um corpo de prova em três camadas, em um cilindro de volume conhecido de 1.000 cm³, utilizando-se um soquete de peso conhecido (2,6 kgf), com o qual são aplicados 25 golpes por camada, deixando-o cair de uma altura de 30,5 cm, o que corresponde a uma energia de, aproximadamente 6,0 kgf cm cm⁻³.

Para cada amostra, pesou-se o cilindro com solo compactado. Após, retirou-se uma amostra que foi acondicionada em lata de alumínio, secas em estufa a 105°C por um período de 72 horas, retiradas da estufa e esfriadas, e novamente pesadas para a determinar a umidade e a densidade do solo.

A seguir, constam as etapas do processo de forma resumida, cujas algumas ilustrações aparecem na Figura 13.

1. Coleta do solo na Estação Experimental;
2. Secagem do solo ao ar na Faculdade da Agronomia da UFRGS;
3. Peneiramento do solo em peneira com malha de 4 mm (20 kg de solo);

4. Cálculo do teor de água (umidade) do solo seco ao ar, em laboratório (forno microondas). Adição da quantidade de água suficiente para obter amostras de solo (2,5 kg por amostra), com cinco teores de umidade 0,09; 0,11; 0,13; 0,15 e 0,17g g⁻¹.
5. Compactação da amostra no cilindro de Proctor em três camadas iguais (cada uma cobrindo aproximadamente um terço do molde), aplicando-se em cada camada 25 golpes uniformemente distribuídos pelo interior do cilindro;
6. Remoção da base do cilindro e aplainamento do solo na parte superior.
7. Pesagem do conjunto cilindro + solo úmido compactado.
8. Retirada de amostra do cilindro, com auxílio de furadeira, e coleta de uma pequena quantidade de solo para a determinação da sua umidade. Essa amostra foi pesada, colocada em estufa por 72 horas e pesada novamente para calcular os teores de água efetivamente obtidos em cada amostra na obtenção da curva de compactação.



FIGURA 13. Ilustração de algumas etapas do ensaio Proctor Normal: (A) Pesagem da quantidade de solo necessária para cada teste; (B) Mistura homogênea do solo com água para obtenção do teor de água estipulado para a curva de compactação. (C) Adição do solo no cilindro, em camadas; (D) Aplicação dos 25 golpes sobre o corpo de prova; (E) Pesagem do cilindro + solo úmido.

A energia aplicada durante este processo é denominada energia de compactação (E_c) e pode ser descrita pela seguinte equação:

$$E_c = \frac{(P.L.N.n)}{V}$$

Onde:

P: peso do soquete (2,6 kgf)

L: altura queda soquete (30,5 cm)

N: n° golpes por camada (25)

n: n° de camadas (3)

V: volume do cilindro (1.000 cm³).

Para análise estatística foi utilizado o pacote estatístico SPSS, onde foram feitas as comparações de médias pelo teste de Tukey com 5% e 10% de significância.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio de Proctor, um dos objetivos é a determinação do teor de água do solo que deve ser respeitado para que não ocorra tráfego de máquinas e animais nas lavouras, evitando-se a compactação. Pinto (2000) relata valores médios de umidade ótima e densidades para obtenção da máxima compactação em solos de textura arenosa variam de 0,07 a 0,12 g g⁻¹ e 2,0 Mg m⁻³, respectivamente. Ao se comparar estes com os valores obtidos neste trabalho (Tabela 12), constata-se que há uma coerência, já que a textura do Argissolo Vermelho Distrófico típico é predominantemente arenosa. No entanto, Ohu et al. (1989) citam que a curva de compactação do solo é influenciada por outros fatores, tais como energia de compactação, mineralogia e teor de matéria orgânica.

Na Tabela 12 estão listados os valores da umidade ótima de compactação, a densidade do solo no campo, densidade máxima do solo, assim como a densidade relativa do solo submetido a diferentes sistemas de manejo e preparo.

Ao comparar os valores obtidos nos diferentes sistemas de preparo do solo, constata-se que a densidade máxima situa-se dentro do intervalo admissível aos encontrados por outros pesquisadores. As diferenças ocorridas são insignificantes, também porque o solo é o mesmo nos diferentes manejos.

Os valores críticos ao desenvolvimento radicular em solos arenosos são de 1,75 Mg m⁻³ e, de 1,27 Mg m⁻³ em argilosos (Medina, 1985; Corsini & Ferraudo, 1999). As densidades encontradas neste trabalho estão todas abaixo do valor crítico. Como o solo estudado é um franco-argilo-arenoso, pode-se considerar como críticos valores ao redor de 1,65 Mg m⁻³. No campo nativo o solo encontra-se com valor de DR bem menor da que os da faixa admissível (0,68) e com valor mais baixo de todos os tratamentos, o que pode ser justificado pelo fato que essa área está preservada e porque nela ocasionalmente há tráfego de máquinas (roçadas), mas com pouco efeito sobre a estrutura do solo, comparado às áreas de produção.

De acordo com Dias Júnior (1996) dentre os valores da densidade relativa apresentados na Tabela 12, a seguir, observou-se que, praticamente em todos os preparos, o solo encontra-se com valores dentro da faixa admissível (0,85 a 0,90). Mas no campo nativo, o solo encontra-se com valor bem abaixo (0,68), indicando boa estruturação do mesmo. A situação é crítica no sistema plantio direto, em quase todos os blocos, já que os valores de DR estão próximos ao limite. No entanto, não se têm verificado alterações na produtividade das culturas, como a de soja, bastante suscetível à

alterações relacionadas à compactação do solo (Bizarro, 2004; Menegati et al., 2004; Bizarro, 2008).

De maneira geral, os resultados da densidade do solo expostos na Tabela 12 apresentam pequenas diferenças, o que era de esperar, já que a densidade depende também da composição mineralógica do solo. Observando-se os resultados de DR por bloco, nota-se que nos blocos I, II, V e VIII, os tratamentos com plantio direto apresentam valores inferiores aos dos preparos convencional e reduzido. Isto se deve ao fato de que o revolvimento do solo promovido, sobretudo no preparo convencional, permite a exposição da matéria orgânica à oxidação que provavelmente tenha promovido uma redução dos teores da mesma, o que acaba contribuindo para um aumento da densidade. Outra possível explicação referente aos altos valores de DR no PC é a mistura do solo de diferentes camadas, já que em Argissolos, o teor de argila e, conseqüentemente, dos óxidos de ferro é maior na subsuperfície. Quanto ao PR pode-se dizer que o comportamento é quase o mesmo quanto ao do PD, mas no bloco IV a menor densidade foi encontrada na área conduzida sob plantio reduzido, podendo-se inferir que a baixa mobilização do solo permite que este apresente um comportamento próximo ao do PD quanto ao valor da densidade relativa do solo (DR).

Como se pode observar, a maioria dos valores de densidade relativa apresentados na Tabela 12 encontra-se dentro ou muito próximo da faixa admissível (0,85 a 0,90), de acordo com Dias Júnior (1996). Trabalhando em solos arenosos, Carter (1990) obteve máximo rendimento de cereais quando a densidade relativa se manteve entre 0,77 e 0,84. O autor ressalta ainda que, em áreas sob plantio direto, uma DR de 0,89 já afetou o desenvolvimento das plantas, sobretudo por deficiência de aeração do solo, causada pela redução do volume de macroporos. Outro trabalho, confirmando essa idéia, foi desenvolvido por Hakansson (1990), que encontrou o máximo rendimento de cevada (*Hordeum vulgare L.*) em solos da Suécia quando a DR se encontrava próximo a 0,87. O autor destaca, porém, que a influência da textura do solo sobre o valor da densidade máxima parece ser pequena.

TABELA 12. Densidade do solo na condição de campo (Ds), umidade ótima para compactação (UOC), densidade máxima do solo ($D_{s_{máx}}$) e densidade relativa (DR) em diferentes sistemas de manejos e preparos de um Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Bloco	Método de Preparo	UOC kg kg^{-1}	Ds (0-20cm) (Mg m^{-3})	$D_{s_{máx}}$ (0-20 cm) (Mg m^{-3})	DR
I	PD	0,16	1,50	1,69	0,89
	PR	0,14	1,46	1,76	0,83
	PC	0,13	1,47	1,71	0,86
II	PD	0,16	1,58	1,64	0,96
	PR	0,16	1,37	1,67	0,82
	PC	0,14	1,49	1,72	0,87
III	PD	0,13	1,51	1,67	0,90
	PR	0,16	1,35	1,66	0,81
	PC	0,16	1,45	1,66	0,87
IV	PD	0,16	1,52	1,63	0,93
	PR	0,16	1,38	1,60	0,86
	PC	0,18	1,43	1,64	0,87
V	PD	0,15	1,52	1,62	0,94
	PR	0,16	1,51	1,67	0,90
	PC	0,15	1,44	1,68	0,86
VI	PD	0,16	1,49	1,73	0,86
	PR	0,15	1,33	1,61	0,83
	PC	0,15	1,42	1,69	0,84
VIII	PD	0,15	1,50	1,63	0,92
	PR	0,13	1,33	1,67	0,80
CN	PC	0,15	1,47	1,67	0,88
		0,10	1,61	2,38	0,68

Estudos realizados por Liepic et al. (1991), com cultura de cevada em dois solos siltosos, concluíram que, para ambos os solos, o crescimento das plantas e o rendimento de grãos foi reduzido quando a DR excedeu valores de 0,91 e 0,88, respectivamente. Porém, Ferreras et al. (2001), em solo siltooso da Argentina, encontraram para o sistema PD e PR valores de DR de 0,82 e 0,69 na camada superficial (0-6 cm) e de 0,87 e 0,85 na camada de 10-16 cm, respectivamente. Os autores, nesse solo, observaram que a

cultura de soja apresentou menor rendimento de grãos no PD do que no PR. Com base nestas afirmações, pode-se dizer que os valores de DR na Tabela 12 estão dentro do limite e aqueles que se encontram fora do limite admissível, é devido provavelmente ao fato de misturar o solo das duas camadas, já que a amostra foi coletada na camada de 0 a 20 cm, e como com o aumento da profundidade, a tendência de DR é de aumentar como mostraram os resultados antes citados. Deste modo, a diminuição do espaço poroso poderia afetar os valores de DR, fato que foi comentado no estudo I, onde a densidade aumentou em profundidade em todos os sistemas de preparo (Tabela 3).

Como se pode constatar, alguns valores de DR (Tabela 12) estão muito acima dos valores do limite admissível apresentado na literatura, e verificando-se que em trabalhos anteriores não houve diferenças entre os tratamentos quanto ao rendimento das culturas, pode-se inferir que há interferência de outros fatores, como, por exemplo, as condições climáticas e os próprios sistemas de manejo e preparo do solo (Levien et al., 2008; Stürmer et al., 2009). Assim, talvez seja necessário estabelecer valores limites de DR de acordo com cada sistema de cultivo, de preparo e tipo de clima.

Na tabela 12, com relação aos valores das densidades do solo no sistema plantio direto nos diferentes blocos, notou-se que a menor densidade foi registrada nos blocos VI ($1,49 \text{ Mg m}^{-3}$), I ($1,50 \text{ Mg m}^{-3}$) provavelmente causado pelo uso da irrigação e VIII ($1,5 \text{ Mg m}^{-3}$), pelo uso de adubação orgânica, o que pode ser explicado pelo maior acúmulo de matéria orgânica ao longo do tempo, o que contribui para aumentar o tamanho e a estabilidade dos agregados, e conseqüentemente, a sua porosidade total (Dexter, 1988; Bayer & Mielniczuk, 1996). A matéria orgânica também é menos densa que a fração mineral (Baver et al., 1972; Kiehl, 1979), o que colabora para os menores valores de densidade do solo nos tratamentos com adubação orgânica e aqueles que recebem irrigação e, por conseqüência, produzem mais matéria vegetal, em especial nos anos com deficiência hídrica.

Pode-se inferir ainda que, no bloco VIII, que recebeu adubação orgânica, o solo apresentou a menor densidade no PR (Tabela 12). Por outro lado, nos blocos com adubação mineral, as diferenças nos valores de densidade entre os sistemas de preparo praticamente não existiram. Isto pode ser justificado pelo fato de que no sistema de manejo com adubação mineral, os agregados criados pelo preparo são pouco estáveis, devido à oxidação da matéria orgânica, que é acelerada pelo revolvimento, considerando também o menor aporte de matéria orgânica em comparação ao sistema com adubação orgânica.

No entanto, isso também ocorreu no PR do bloco VI, sob adubação mineral, onde o solo apresentou também a baixa densidade ($1,33 \text{ Mg m}^{-3}$). Esses dados levam a destacar a importância da escarificação no que diz respeito ao aumento da porosidade do solo, acarretando assim uma melhoria na aeração e, conseqüentemente, a diminuição da densidade.

A análise estatística demonstrou que não houve diferenças entre as médias obtidas, considerando as formas de adubação, sobre os valores da densidade máxima do solo, nem nos valores da densidade relativa do solo (Tabela 13). As mesmas propriedades também não foram afetadas pelo manejo das culturas (rotação ou sucessão) (Tabela 14 e 15).

TABELA 13. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{S_{\text{máx}}}$) e de densidade relativa (DR) na profundidade de 0 a 20 cm, considerando as formas de adubação mineral e orgânica, independentemente dos métodos de preparo e de manejos do solo.

Manejo do solo (Adubação)	Blocos	$D_{S_{\text{máx}}}$ (Mg m^{-3})	DR
Mineral	I	1,72	0,86
	II	1,67	0,88
	III	1,66	0,86
	V	1,66	0,89
	VI	1,67	0,84
	Média	1,67	0,87
Coeficiente de variação (%)		2,14	4,77
Orgânico	IV	1,62	0,88
	VIII	1,65	0,86
	Média	1,64	0,87
Coeficiente de variação (%)		2,09	5,51

Valores nas colunas com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

TABELA 14. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{S_{\text{máx}}}$) e de densidade relativa (DR) dos blocos sob sistema de manejo rotação de culturas, na profundidade de 0 a 20 cm, independentemente dos métodos de preparo do solo.

Bloco	$D_{S_{\text{máx}}}$ (Mg m^{-3})	DR
I	1,72	0,86
V	1,66	0,90
VIII	1,66	0,86
Coeficiente de variação (%)		4,99

Valores nas colunas com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

TABELA 15. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{S_{máx}}$) e de densidade relativa (DR) dos blocos sob sistema de manejo sucessão de culturas, na profundidade de 0 a 20 cm, independentemente dos métodos de preparo do solo.

Bloco	$D_{S_{máx}}$ ($Mg\ m^{-3}$)	DR
II	1,68	0,88
IV	1,62	0,88
VI	1,68	0,84
Coefficiente de variação (%)	2,45	4,88

Valores nas colunas com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P<0,10$).

Na Tabela 16, nota-se que os métodos de preparos não causaram diferenças nos valores da densidade do solo, tal como foi observado no estudo I. No entanto, o PD diferiu dos demais tratamentos de preparo de solo, apresentando um valor acima do considerado ideal por muitos autores, para boa condição física do solo.

TABELA 16. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{S_{máx}}$) e de densidade relativa (DR) dos métodos de preparo do solo, com e sem uso de irrigação, na profundidade de 0 a 20 cm, independentemente do sistema de manejos das culturas.

Método de preparo	$D_{S_{máx}}$ ($Mg\ m^{-3}$)	DR
PD	1,66 a	0,91 a
PR	1,66 a	0,83 b
PC	1,68 a	0,86 b
Coefficiente de variação (%)	2,41	3,54

Valores nas colunas com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si e valores nas colunas seguidos de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($P<0,10$).

Considerando as médias obtidas entre os tratamentos em que foi empregada irrigação suplementar para as culturas de primavera-verão e naqueles sem uso de irrigação (Tabela 17), verifica-se que não houve diferença significativa nos valores de $D_{S_{máx}}$ e DR.

TABELA 17. Comparação de médias de densidade máxima do solo ($D_{S_{máx}}$) e de densidade relativa (DR), na profundidade de 0 a 20 cm, dos blocos com irrigação e sem irrigação.

Bloco	$D_{S_{máx}}$ ($Mg\ m^{-3}$)	DR
I (com)	1,72	0,86
II (com)	1,68	0,88
V (sem)	1,66	0,90
VI (sem)	1,68	0,84
Coefficiente de variação (%)	2,52	4,44

Valores nas colunas com ausência de letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P<0,10$).

As curvas de compactação obtidas pelo ensaio Proctor Normal, dos oito blocos com diferentes manejos: adubação mineral (AM) e irrigação (I), adubação mineral

(AM) e adubação orgânica (AO) e campo nativo (CN), estão apresentadas nas Figuras 14 a 21, considerando amostras coletadas na profundidade de 0 a 20 cm. De maneira geral observou-se que as curvas de compactação apresentaram formato que independeu dos métodos de preparo, ou seja, todos os preparos do solo tiveram comportamento semelhante, nos manejos avaliados, em relação à compactação.

Esse comportamento pode-se justificar considerando o argumento usado no capítulo I, ou seja, a densidade nas umidades baixas pode ser influenciada pela água adicionada que cria filmes de água ao redor das partículas minerais, reduzindo o atrito entre as mesmas e facilitando a compactação do solo. Na umidade na qual a compactação é máxima, a adição de mais água resulta em que a mesma venha a ocupar os espaços existentes entre as partículas do solo, o que causa o surgimento de pressões neutras, tornando o solo menos susceptível à compactação (Ohu et al., 1989).

O comportamento dos tratamentos quanto à densidade máxima do solo obtida foi praticamente semelhante em todos os sistemas, com uma seqüência na seguinte ordem: PD<PR<PC (Figuras 15, 18 e 20), mas na Figura 14, apesar do PD ser o menos denso, houve uma mudança de comportamento entre o PR e PC (PD<PC<PR). Nestes tratamentos, o PD apresentou menores valores de $D_{s_{máx}}$ em menor teor de água do solo do que os demais métodos de preparo (PC e PR). Nos blocos III, IV e VI (Figuras 16, 17 e 19, respectivamente), o preparo PD apresentou maiores valores de $D_{s_{máx}}$, num teor de água menor, semelhante e maior, respectivamente, em relação ao PC e PR. Nos tratamentos onde o PD teve menores valores de D_s do que os demais métodos de preparos pode-se inferir que tal comportamento é causado pela presença de matéria orgânica acumulada na camada superficial e também porque nesta camada há ausência de adensamento, portanto, a densidade tende a ser menor. O PR foi o sistema que alcançou uma maior densidade com o menor teor de umidade (Figura 21), fato que pode ser justificado pelo fato de apresentar menor teor de MOS (Tabela 3), comparado com outros tratamentos e não há muita diferença com o PC. Na área de Pousio, no bloco III, onde o comportamento foi invertido, ou seja PC<PR<PD, pode-se notar que o PD foi que alcançou a maior densidade, enquanto o PR e PC tiveram valores semelhantes (Figura 16).

A matéria orgânica, nas camadas superficiais, influi diretamente no comportamento físico e químico do solo atuando como ligante orgânico, reforçando os pontos de contato existentes entre as partículas minerais, estabelecendo pontos de contatos adicionais entre as partículas minerais e aumentando a força de adsorção dos

íons e das moléculas de água nos pontos de contato. Portanto, o acúmulo de matéria orgânica no solo pode resultar em aumento da coesão do solo (Braida, 2004).

O tratamento testemunha (CN) apresentou o maior valor de $D_{s_{máx}}$ num menor teor de água no solo (Figura 21) dentre todos os avaliados.

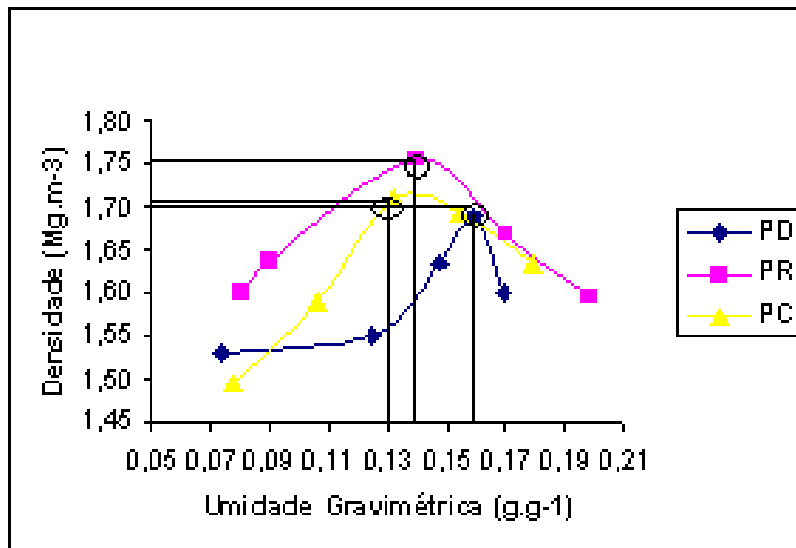


FIGURA 14. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco I, com adubação mineral (AM), irrigado (I), com rotação de culturas (R), na camada de 0-20 cm de profundidade.

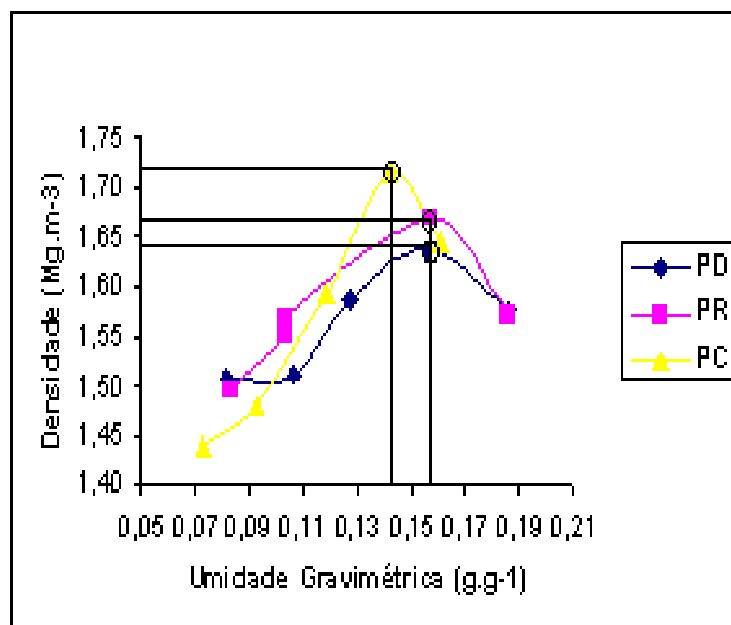


FIGURA 15. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco II, com adubação mineral (AM), irrigado (I), com sucessão de culturas (S), na camada de 0-20 cm de profundidade.

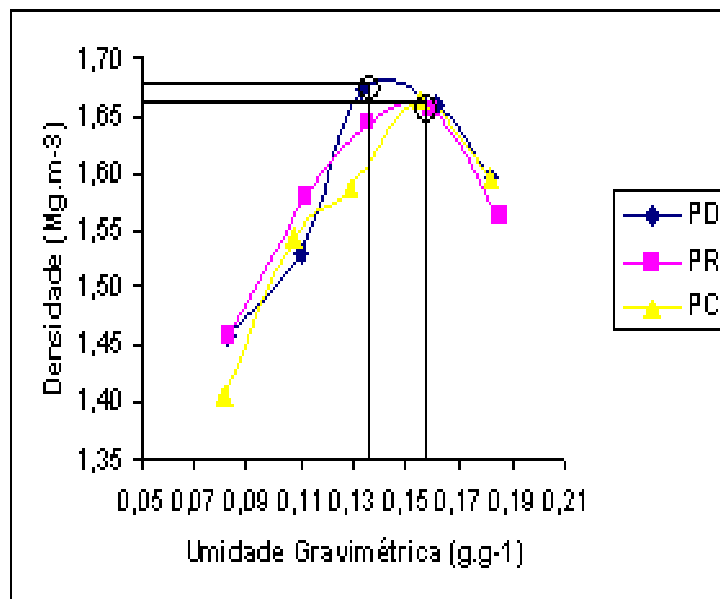


FIGURA 16. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco III, com adubação mineral (AM) e pousio no inverno (P), na camada de 0-20 cm de profundidade.

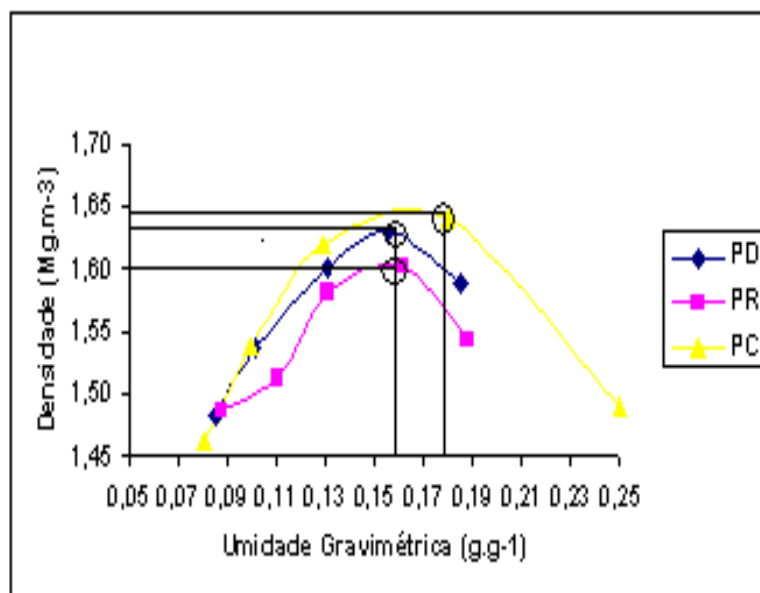


FIGURA 17. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco IV, com adubação orgânica (AO) com sucessão de culturas (S), na camada de 0-20 cm de profundidade.

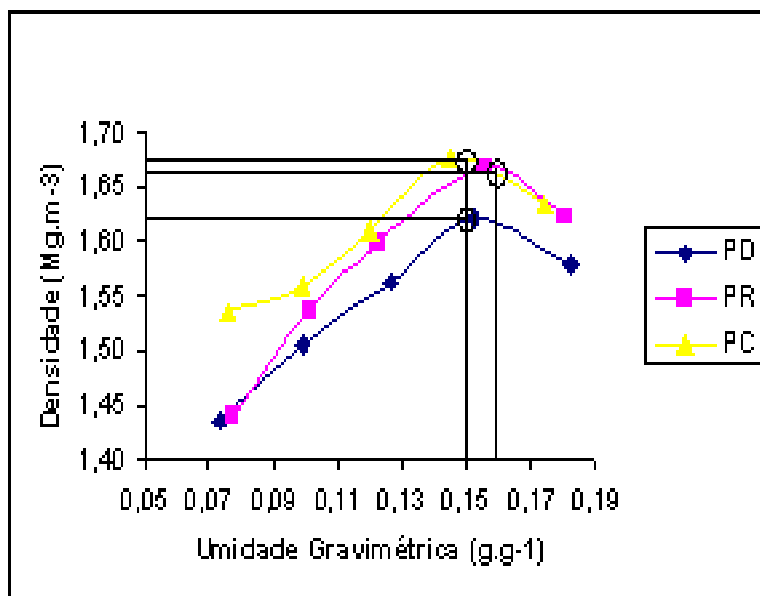


FIGURA 18. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco V, com adubação mineral (AM) com rotação de culturas (R), na camada de 0-20 cm de profundidade.

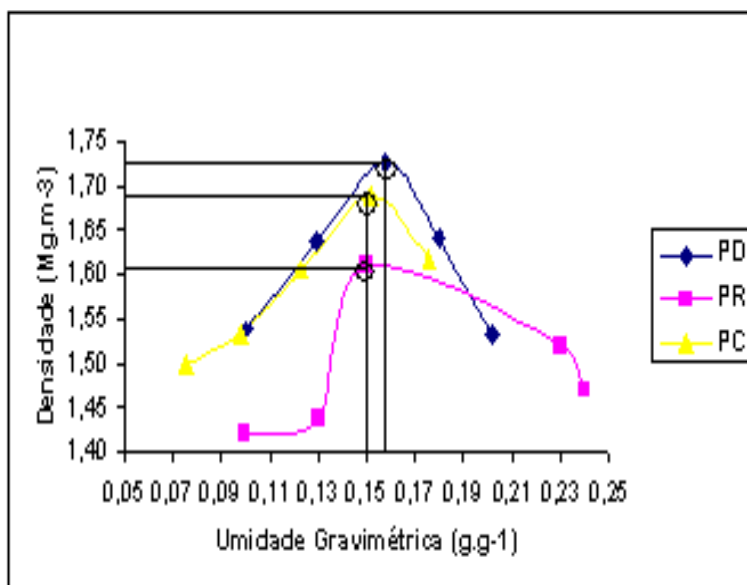


FIGURA 19. Curvas de compactação nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco VI, com adubação mineral (AM) com sucessão de culturas (S), na camada de 0-20 cm de profundidade.

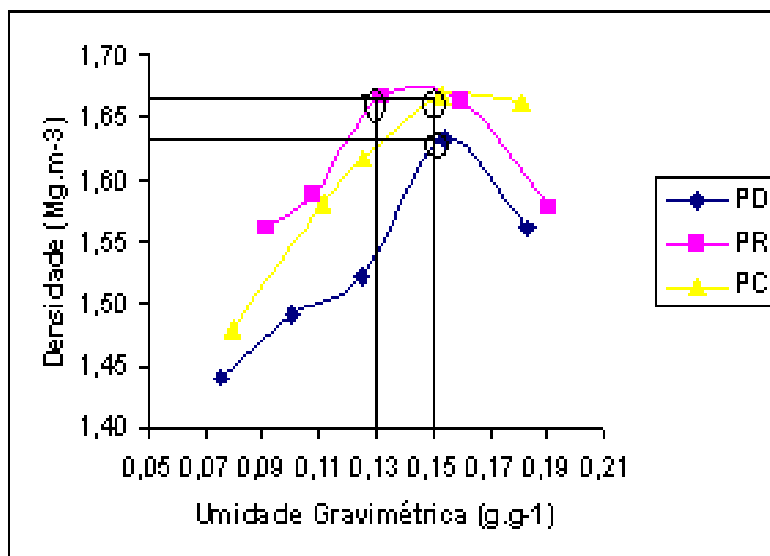


FIGURA 20. Curvas de compactação do solo nos três diferentes preparos do solo (PD = plantio direto; PR = preparo reduzido e PC = preparo convencional), no Bloco VIII, com adubação orgânica (AO) e rotação de culturas (R), na camada de 0-20 cm de profundidade.

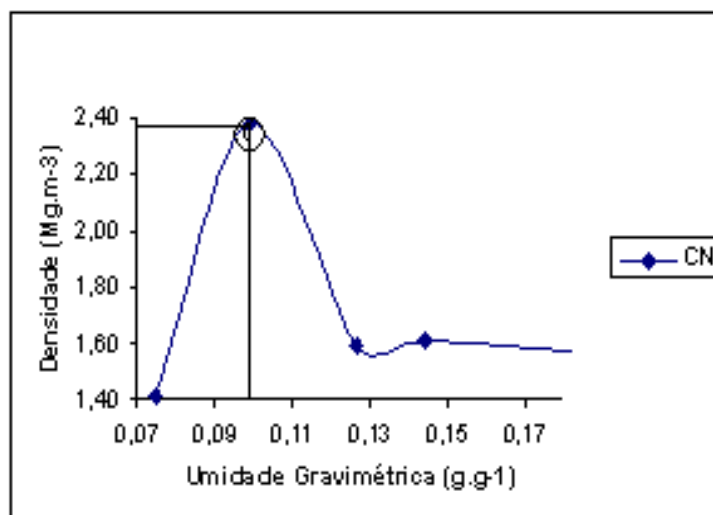


FIGURA 21. Curvas de compactação no Bloco VII, área do campo nativo (CN), na camada de 0-20 cm de profundidade.

Após analisar as curvas de compactação obtidas pelo ensaio de Proctor nos diferentes métodos de preparo do solo nos manejos existentes no experimento na camada de 0 a 20 cm, repetiu-se o processo só para o plantio direto (PD) na camada de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm. Analisou-se 5 blocos, representando diferentes sistemas de manejo. Ao comparar as curvas de compactação do PD nas duas camadas estudadas, observou-se que o comportamento das curvas de compactação foi semelhante nos

manejos Adubação Mineral Irrigado e Abudação Mineral (pousio), onde a camada de 0 a 10 cm apresentou maior D_s que a de 10 a 20 cm, $PD_{10} > PD_{20}$ (Figuras 22, 23 e 24) o que implica que o teor de MO difere decrescentemente na profundidade (Tabela 3). Essa tendência foi mais acentuada no manejo Adubação Mineral Irrigado (AM) e (I), o que pode ser justificado justamente pela presença da irrigação, que pode acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica e, logo, permite seu deslocamento para a camada subsuperficial durante a infiltração de água. No bloco seis, (com adubação mineral) (Figura 25) e no bloco oito, manejo com adubação orgânica (Figura 26), notou-se um equilíbrio entre as duas camadas, $PD_{10} < PD_{20}$. De forma geral, era de se esperar que no PD, por ser um sistema conservacionista de produção agrícola, caracterizado por baixa mobilização do solo, a camada superficial apresentaria curva de compactação com valores de densidade do solo mais baixos do que a imediatamente inferior, por apresentar mais MO, o que realmente ocorreu nos dois blocos com adubação orgânica.

Nas Figuras 22, 23 e 24, a camada de 0 a 10 cm no plantio direto apresentou curvas de compactação com maiores valores de D_s que na camada de 10 a 20 cm. Vários trabalhos de pesquisa, em análise de densidade do solo em diferentes manejos, concluíram que, de forma geral, o solo sob plantio direto apresenta densidade mais elevada (Sidiras et al., 1984; Vieira, 1985; Klein e Boller, 1995), pela presença do efeito de compactação da camada superficial. Isso foi comprovado no estudo I, que em alguns manejos o PD era mais compacto, comparado aos demais métodos de preparo (Tabela 3).

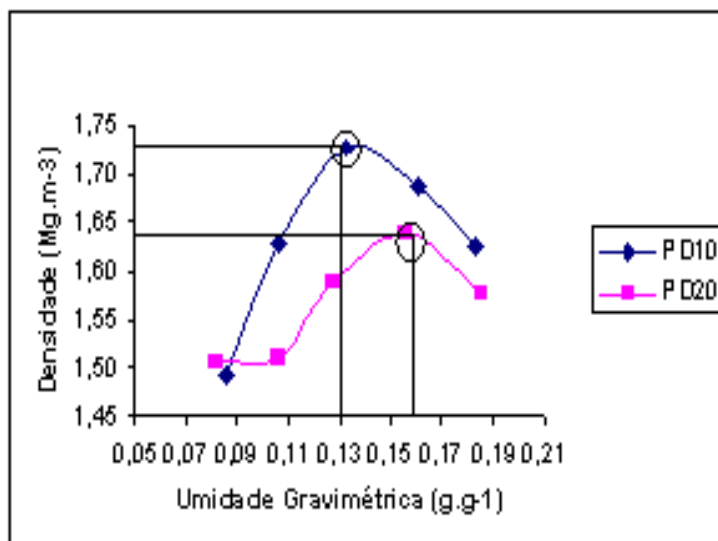


FIGURA 22. Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 – 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco II, com adubação mineral (AM), irrigado (I) e com sucessão de culturas (S).

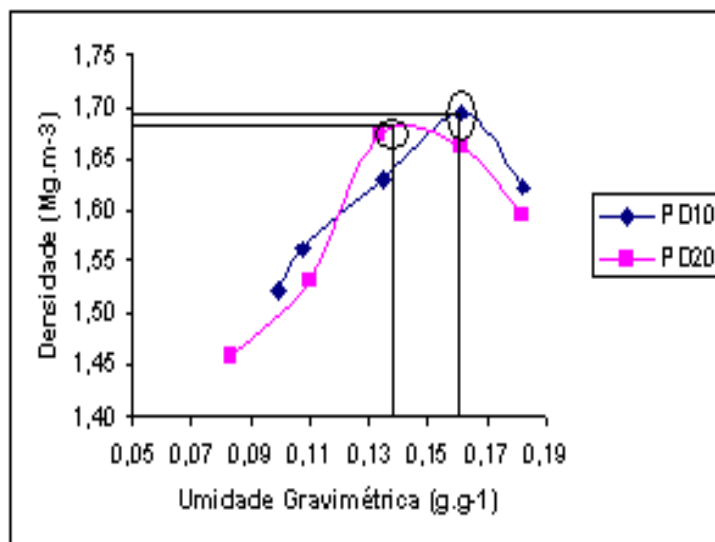


FIGURA 23. Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco III com adubação mineral (AM) e Pousio (P).

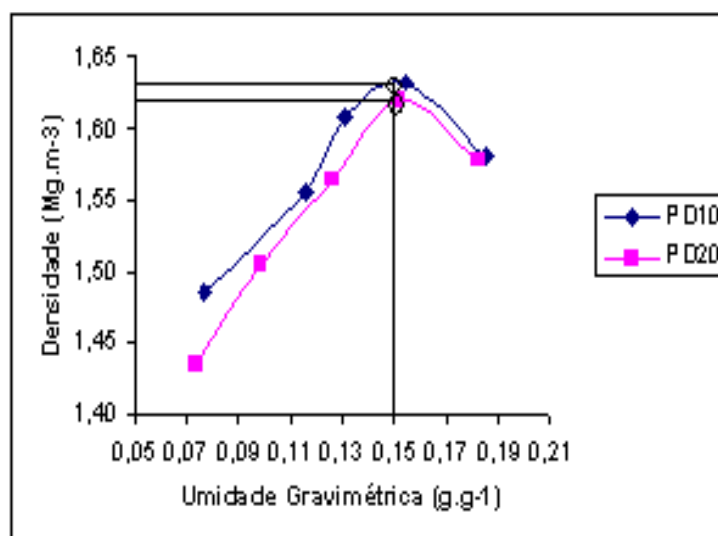


FIGURA 24. Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco V com adubação mineral (AM) e com rotação de culturas (R).

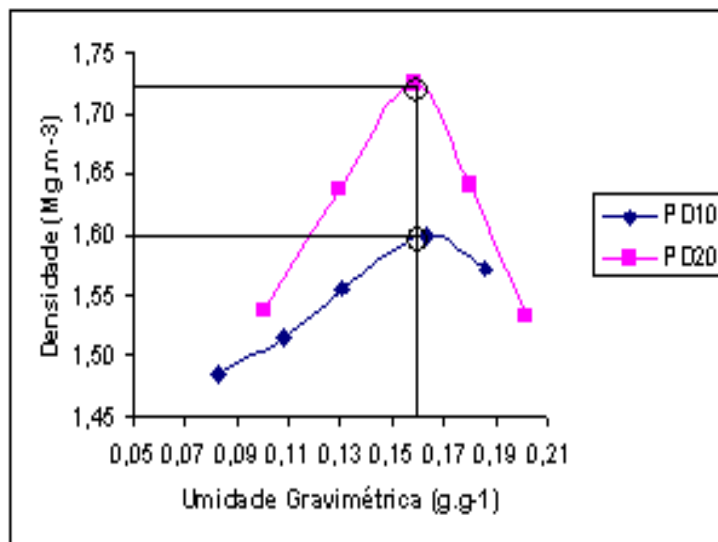


FIGURA 25. Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco VI, com adubação mineral (AM) e com sucessão de culturas (S).

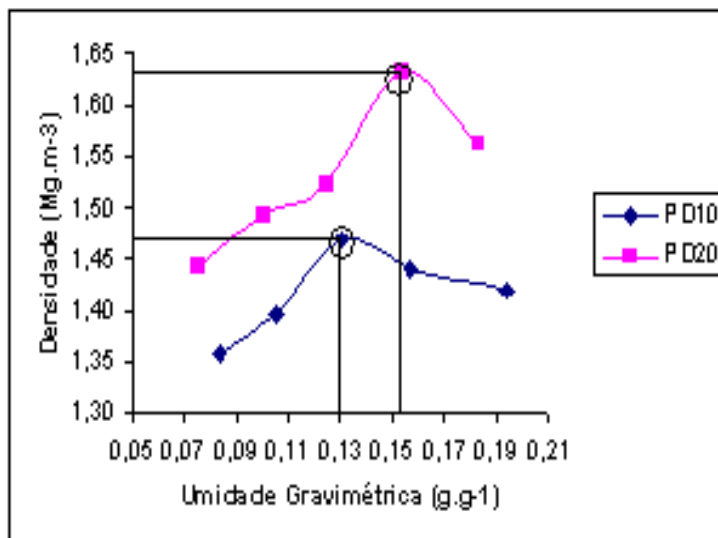


FIGURA 26. Curvas de compactação do solo em Plantio Direto na profundidade de 0 - 10 cm (PD10), comparada à do plantio direto na profundidade de 10 - 20 cm (PD20), no Bloco VIII, com adubação orgânica (AO), rotação de culturas (S).

5.4. CONCLUSÃO

Após seis anos de utilização do Argissolo, anteriormente ocupado por campo nativo, os tratamentos de preparo do solo e manejo de culturas não determinaram valores de densidade máxima e densidade relativa restritivos à produtividade de culturas anuais, baseados no ensaio de Proctor Normal.

Os métodos de preparo, sistemas de manejo das culturas e irrigação não causaram diferenças nos valores da densidade máxima do solo obtidos pelo ensaio Proctor Normal. Entre os tratamentos de preparo de solo, o PD apresentou um valor de DR acima do considerado ideal por muitos autores, para boa condição física do solo.

Nos tratamentos sob PD, os maiores valores de densidade do solo máxima foram obtidos com solo da camada de 10 a 20 cm.

Nos diferentes sistemas de manejo, o acúmulo de matéria orgânica no solo reduziu a densidade e aumentou a umidade crítica de compactação do solo, aumentando assim a resistência à compactação.

O Campo Nativo, mesmo tendo maior valor de densidade do solo, apresentou maiores valores de $D_{s_{máx}}$ e menores de DR dentre todos os tratamentos estudados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, os resultados obtidos em diferentes sistemas de manejo e de preparo do solo corroboram com a hipótese do trabalho, com relação às pressões de pré-consolidação e o grau de compactação. Os preparos do solo tiveram uma grande influência nas alterações e diferenças nos valores da pressão de pré-consolidação, índice de compressibilidade e do índice de relaxamento. O não revolvimento do solo garantiu uma maior pressão de pré-consolidação do mesmo. O acúmulo de matéria orgânica nos sistemas de preparo sem revolvimento apresentou uma relação proporcional com a pressão de pré-consolidação e inversamente proporcional ao índice de compressibilidade. Os sistemas de manejo e os métodos de preparo de solo não causaram diferenças nos valores da densidade máxima do solo obtidos pelo teste Proctor. Isso pode ser devido à baixa intensidade de tráfego das máquinas utilizadas no experimento, à baixa pressão que os rodados dessas máquinas exercem sobre o solo, o não revolvimento do solo no período de outono/inverno e a ausência de pisoteio animal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de Solo. Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo. Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 11p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007:** Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990. 13p.

ABRÃO, P.U.R. et al. Efeitos de sistema de preparo do solo sobre características de um Latossolo Roxo distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.3, p.169-172, 1979.

ABREU, L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.28, p.519-531, 2004.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.73, n.1-2, p.145-160, 2003.

ALLISON, F.E. Soil aggregation - Some facts and fallacies as seen by a microbiologist. **Soil Sci.**, Madison, v.106, p.136-143, 1968.

AMADO, T.J.C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.25, p.189-197, 2001.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.49, n.1-2, p. 159-170, 1998.

ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer** – ASAE EP542. Saint Joseph, 1999.

ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer** – ASAE S313.3. St. Joseph, 2004. 2p.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.29, n.4, 2005.

BAUMGARTL, T.; HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.19, p.203-213, 1991.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 498p.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.21, p.235-239, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.24, p.599-607, 2000.

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

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R. **Agroclima da Estação Experimental Agrônômica**. Porto Alegre : Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS, 1990. 96p.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.39, n.6, p.581-8 2004.

BIZARRO, M.J. **Inoculação de soja em solo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2004. 59f. [Dissertação \(Mestrado\) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.](#)

BIZARRO, M.J. **Simbiose e variabilidade de estirpes de Bradyrhizobium associadas à cultura da soja em diferentes manejos do solo**. 2008. 97 f. [Tese \(Doutorado\) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.](#)

BONEL, B. A. et al. Descompactación del suelo mediante el uso de escarificadores en Argiudoles típicos del sur de Santa Fe. In: JORAJORUÍA COLLAZO, D. (Ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario**. La plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p.1-11.

BOTTA, G.F. et al. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.86, p.9-14, 2006.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison : American Society of Agronomy, 1986. 1188p.

BRAIDA, J.A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 126 f. 2004.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

CAMARA, R.C. ; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.29, p.789-796, 2005.

CAMPONEZ DO BRASIL, R.P. **Influência das técnicas de coleta de amostras na determinação das propriedades físicas do solo**. 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Irrigação e Drenagem, Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2000.

CAMPOS, B.C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.19, n.1, p.121-126, 1995.

CAPUTO; H.P. **Mecânica de solos e suas aplicações** – Fundamentos. 6^a.ed. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 1988. 219p.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 14, p 99-105, 1990.

CARPENEDO, V. **Compressibilidade de solos em sistemas de manejo**. 106 f. 1994. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine sandy loam. **Can. J. Soil Sci.**, Ottawa, v.70, p.425-433, 1990.

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

CAVALIERI, K.M.V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.30, p.37-147, 2006.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.9, p.263-266, 1985.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I; FERNANDES, F.M.. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades químicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.9, p.267-270, 1985.

CEPIK, C.T.C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante**. 2006. 104 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CHAMEN, T. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2. Equipment and field practices. **Soil Till. Res.**, [S.l.], v.73, p.161-174, 2003.

- CHANCELLOR, W.J. Soil physical properties. In: CHANCELLOR, W. J. (Coord.). **Advances in soil dynamics**. Saint Joseph: ASAE, 1994. p. 21-254.
- CHANEY, K.; HOKGSON, D.R.; BRAIM, M.A. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil physical properties in a long-term experiment on spring barley. **J. Agr. Sci.**, Cambridge, v.104, n.1, p.125-133, 1985.
- CHOUDARY, M.; BAILEY, L.D.; GRANT, C.A. Review of the use of swine manure in crop production: effects on yield and composition and on soil and water quality. **Waste Management and Research**, Copenhagen, v.14, p.581-595, 1996.
- CONCEIÇÃO, P.C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.29, p.777-788, 2005.
- CORAZZA, E.J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.23, p.425-432, 1999.
- CORRÊA, J.C. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.20, n.11, p.1317-1322, nov. 1985.
- CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.34, n.2, p.289-298, 1999.
- COSTA, F.S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.27, p.527-535, 2003.
- D'AGOSTINI, L.R. **Variações temporais da coesividade entre agregados de solo**. 1992. 82 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1992.
- DAO, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. **Agron. J.**, [S.l.], v.88, p.141-148, 1996.
- DAY, P.R.; HOLMGREM, G.G. Microscopic Changes in Soil Structure During Compression. **Soil Sci Soc Am J.**, Madison, v.16, p.73-77, 1952.
- DEBIASI, H.; LEVIEN, R. Recuperação de solos fisicamente degradados através de coberturas de inverno. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA GUA, 16., 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2006. 1 CD-ROM.
- DEBIASI, H. Recuperação física de um argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-planta-máquina. 2008. 288 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

- DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.32, p.2629-2637, número especial, 2008.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.11, p.199-238, 1988.
- DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing, 1994.
- DIAS JUNIOR, M.S. **Notas de aula de física do solo**. Lavras : Universidade Federal de Lavras, 1996. 168p. (Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas).
- DIAS JUNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 20, p. 175-182, 1996.
- DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa , v.1, p.55-94, 2000.
- DISERENS, E. et al. Procédés de recherche dans l'évaluation des risques de compactage en sol agricole. L'exemple des récolteuses intégrales en culture betteravière.(FAT), CH-8356, Zurich, Suisse, 2004. Disponível em : <[Http /natres.psu.ac.th/link/soilcongress/bdd/symp2/2554-t.pdf](http://natres.psu.ac.th/link/soilcongress/bdd/symp2/2554-t.pdf)> Acesso em: 25 abr. 2009.
- EKWUE, E.I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil Tillage Res.**, Amsterdam, v.16, p.289-297, 1995.
- ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G. & JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.13, p.259-267, 1989.
- EMBRAPA-CNPS – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA-CNPS – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.
- ETANA, A. et al. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.52, n.3-4, p.129-139, 1999.
- FERNANDES, B. et al. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição de poros de dois solos (“Tipic Argiaquoll” e “Tipic Haplu-dalf”). **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.7, p.329-333, 1983.
- FERRERAS, L.A. et al. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.36; p.161-170, 2001.
- FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, n.24, p.487-493, 2000.

FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.38, n.8, p.947-53, 2003.

FONSECA, J.C.L. et al. Avaliação da confiabilidade analítica das determinações de carbono orgânico total (COT). **Eclética Química**, São Paulo, v.31, n.3, p.47-52, 2006.

FURLANI, C.E.A. **Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na produtividade da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2000. 218 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

GENRO JUNIOR, S.A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 28, p. 477-484, 2004.

HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil Till. Res.**, Netherlands, v.16, n.1, p. 105-120, 1990.

HAMILTON-MANN, M. et al. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.68, p.109-119, 2002.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 82, n.2, p. 121-145.

HAYNES, R.J.; BEARE, M.H. Aggregation and organic matter storage in mesothermal, humid soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.) **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.213-262.

HENKLAIN, J.C. Influência do tempo no manejo do sistema de semeadura direta e suas implicações nas propriedades físicas do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos**. Rio de Janeiro, SBCS/EMBRAPA, 1997. 1 CD-ROM

HÉNIN, S. **Le Profil Cultural**: principes de physique du sol. Paris : SEIA, 1960. 320p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 413p.

HOLTZ, R.D.; KOVALCS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey : Prentice Hall, 1981. 733p.

HORN, R. et al. 1993. Soil physical properties related to soil structure. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.30, p.187-216, 1993.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam : Elsevier, 1994. p.45-69. (Developments in Agricultural Engineering, 11)

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R.L.; FRYE, W.W. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.58, n.1, p.193-198, 1994.

JORAJURÍA COLLAZO, D. Compactación del suelo agrícola inducida por tráfico vehicular: una revisión. In: JORAJURÍA COLLAZO, D. (Ed.). **Reología del suelo agrícola bajo tráfico: modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario**. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2005. p.39-55

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

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes métodos de manejos do solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.25, p.395-398, 1995.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p. 221-227, 2007.

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não-saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ci. Rural**, Santa Maria, v.32, p.945-953, 2002.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa. v.23, p.497-506, 1999.

LAL, R. No-tillage effects on soil properties and maize (*Zea mays* L.) production in Western Nigeria. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.40, p.321-331, 1974.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.44, p.450-457, 1980.

LEÃO, T.P. Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem. 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em

Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura do milho (*Zea mays L.*)**. 1999. 305 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1999.

LEVIEN, R.; et al. Características físicas e suporte produtivo de um argissolo vermelho, em área de campo nativo, sob diferentes sistemas de preparo do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. [Anais]. Viçosa : SBCS, 2008. v.1, 1 CD-ROM

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 60 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIEPIC, J. et al. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil. Till. Res.**, Amsterdam, v.19, p.307-317, 1991.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 87-94, 2000.

LOPES, P.R.C. **Relações da erosão com tipos e quantidades de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo. Porto Alegre**. 1984. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1984.

LOPES, A.S., et al. **Sistemas plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 2004. 110p.

MACEDO, V.R.M. **Compressibilidade de um Podzólico Vermelho-Escuro fisicamente degradado e recuperado**. 1993. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1993.

MACHADO, J.A.; BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.2, p.81-84, 1978.

MANTOVANI, E.C.; BERTEAUX, S.; ROCHA, F.E. de C. Avaliação da eficiência operacional de diferentes semeadoras-adubadoras de milho. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.27, n.12, p.1579-1586, 1992.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soils for Alberda. **Soil Till Res.**, Amsterdam, 46, 383-397, 1998.

MAZIERO, J.V.G. et al. Efeito da patinagem da roda motriz de um trator agrícola na compactação do solo. **Bragantia**, São Paulo, v.56, 1997.

MEDINA, B.F. Influência de dois métodos de preparo de área na compactação de um Latossolo Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.9, p.67-71, 1985.

MENEGATI, G. B. et al. Estado de compactação do solo, cultivado com culturas anuais produtoras de grãos, em diferentes preparos conservacionistas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. [Anais]. Santa Maria : UFSM, SBCS, 2004. 1 CD-ROM

MERTEN, G. H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 369-374, 1991.

MIRANDA, E.E.V. **Modelagem e mapas de capacidade de suporte de carga de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

MOSADDEGHI, M.R. et al. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.5, p.87-97, 2000.

MUCHOVEJ, R.M.C.; OBREZA, T.A. **Application of organic wastes in agriculture**. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Eds.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa : SBCS/UFV/DPS, 1996. p.901-914

NOGUEIRA, J.B. **Mecânica dos solos**: ensaios de laboratório. São Carlos, USP, EESC, 1998. 248p.

NYAKTAWA, E.Z.; REDDY, K.C.; LEMUNYONJ, L. Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production systems using the revised universal soil loss equation (RUSLE). **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.57, n.1, p.213-224, 2001.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant-Soil**, Netherlands, v.76, p.319-337, 1984.

OADES, J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil Structure. **Geoderma**, Netherlands, v.56, p.377-400, 1993.

OHU, J.O. et al. Critical moisture content as an index of compactability of agricultural soils in Borno State of Nigeria. **Soil Technol.**, [S.l.], v.2, p.211-219, 1989.

PALADINI, F.L.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.15, p.135-140, 1991.

PENA, Y.A.; GOMES, A.S.; SOUZA, R.O. Influência de diferentes sistemas de cultivo nas propriedades físicas de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.20, p.517-523, 1996.

PEREIRA, J. O. et al. Comportamento compressivo de um Nitossolo: efeito do tamanho de agregados, do teor de água e da pressão aplicada. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 749-757, 2005.

PIKUL JR., J.L.; AASE, J.K. Wheat response and residual soil properties following subsoiling of a sandy loam in eastern Montana. **Soil Till. Res.** Amsterdam, v.51, n.1-2, p.61-70, 1999.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 355 p.

POPP, J.; HOAG, D.; ASCOUGH, J. Sustainable soil management: A framework for analysis. **Soil Water Conserv.**, [S.l], v.57, p.66-74, 2002.

RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. **J. Terramech.**, Amsterdam, v.42, n.3-4, p.259-280, 2005.

REEVES, D.W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1995, Passo Fundo. **Resumos**. Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1995. p.127-130.

ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C. da S.; SACRAMENTO, L.V.S. do. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.53, n.2, p.259-66, 1994.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 65, p. 109-115, 2002.

RÜCKNAGEL, J.; HOFMANN, B.; PAUL, R.; CHRISTEN, O. & HÜLSBERGEN, K.J. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.92, p.213-220, 2007.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistema de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.19, n.2, p.313-319, 1995.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecánica de suelos**. Madrid : Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.

SECCO, D.; REINERT, D. J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 16, n. 3, p. 52-61, 1997.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 105 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.28, p.797-804, 2004.

SEIXAS, J.; ROLOFF, G.; RALISCH, R. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. **Ci. Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, 2005.

SIDIRAS, N.; DERPSCH, R.; MONDARDO, A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em Latossolo Roxo distrófico (Oxisol). **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.7, p.103-106, 1983.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R.; ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.8, p.265-68, 1984.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.21, p.313-319, 1997.

SILVA, V. R. **Compressibilidade de um Podzólico e um Latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água**. 1999. 98f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171f. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – estado inicial de compactação. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.26, p.1-8, 2002.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil Till. Res.** Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.

STEPNIEWSKI, W.; HORN, R.; MARTYNIUK, S. Managing soil biophysical properties for environmental protection. **Agr. Ecosystem. Environ.**, Amsterdam, v. 88, p.175-181, 2002.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Maximum bulk density achieved during soil compaction as effected by the incorporation of three organic material. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 36, n..6, p. 1713-1719, 1993.

STURMER, S.L.K. et al. Produtividade de grãos e demanda de tração em hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta afetadas pela profundidade de trabalho, tráfego dos rodados do trator e manejo do solo.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Viçosa : SBCS, 2009. v. 1. p. 1-4.

TAVARES-FILHO, J. et al. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ci. Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.996-999, 2006.

TERZAGHI, K; JELINEK, P. **Theoretische Bodenmechanik**. Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 1954.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **J. Soil Sci.**, Amsterdam, v.33, p.141-163, 1982.

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

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

UNGER, W.P.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A review. **Agron. J.**, [S.l.], v.86, p.759-766, 1994.

VEIGA, M.; PANDOLFO, C.M. **Técnicas melhoradas de manejo de resíduos de colheita e outros insumos orgânicos para uma agricultura sustentável**. Campos Novos, EPAGRI-EECN, 1998. (Projeto de Pesquisa)

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104- 113, 2007.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Sci. Soc. Am. J.**; Madison, v.45, n.2, p.1040-1048, 1981.

VIEIRA, M.L. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.19, p. 873-882, 1984.

WILLIAMS, J.; SHAYKEWICH, C. F. The influence of soil water matrix potential on the strength properties of unsaturated soil. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v. 34, n. 6, p. 835-840, 1970.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 891-900, 2004.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.31, p.263-275, 1994.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.61, p.239-245, 1997.