

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO
SOB FLORESTA E PASTAGEM NO SUL DO BRASIL**

TESE DE DOUTORADO

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

**Santa Maria, RS, Brasil
2008**

QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO SOB
FLORESTA E PASTAGEM NO SUL DO BRASIL

por

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2008

Suzuki, Luis Eduardo Akiyoshi Sanches, 1978-

S968q

Qualidade físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem no sul do Brasil / por Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki ; orientador Dalvan José Reinert. – Santa Maria, 2008.

136 f. ; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2008.

1. Engenharia florestal 2. Argissolo 3. Compactação do solo 4. Compressibilidade do solo 5. Qualidade do solo 6. Estrutura do solo 7. Floresta de eucalipto I. Reinert, Dalvan José, orient. II. Título

CDU: 631.4

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Engenharia Florestal/Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Fone (055) 3220-8336; Fax (055) 3220-8336; End. Eletr: suzuki@mail.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO SOB FLORESTA
E PASTAGEM NO SUL DO BRASIL**

elaborada por
Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Paulo Torres Fenner, Dr. (UNESP)

Deonir Secco, Dr. (UNIOESTE)

José Miguel Reichert, Dr. (UFSM)

Frederico Dimas Fleig, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 27 de março de 2008

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria
Lucinei S.V. Suzuki e Satio Suzuki, e ao meu
irmão, Luis Gustavo A.S. Suzuki.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, que possibilitaram a realização do curso de doutorado e deste trabalho.

À CAPES, pela importante ajuda financeira por meio da bolsa de estudo.

Aos professores Dalvan José Reinert e José Miguel Reichert, pelos ensinamentos, dedicação, paciência, orientação e amizade.

Aos bolsistas e técnicos da Embrapa Clima Temperado (Pelotas, RS), em especial aos pesquisadores Clênio Pillon e Cláudia Liane Rodrigues de Lima, pelo auxílio nas coletas e no laboratório, e pelo convite para realização deste trabalho.

À Aracruz Celulose, representada por Elias F. de Araújo, pelo empréstimo da área em estudo, prestatividade e auxílio nos trabalhos de campo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal: César Augusto Guimarães Finger, Frederico Dimas Fleig, Mauro Valdir Schumacher, Paulo Renato Schneider e Solon Jonas Longhi, pelos ensinamentos passados durante este período.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Cerlene da Silva Machado (Tita), pelo auxílio, prestatividade e amizade.

Aos colegas de Doutorado, pela troca de informações e momentos de descontração.

Aos professores, funcionários, bolsistas e voluntários do Departamento de Solos, pelo convívio durante esse período.

Aos monitores das disciplinas de Solos, Dieisson Pivotto, Eduardo Vogellmann, Guilherme Cassol e Matheus Pontelli, pelo convívio e companheirismo,.

Aos amigos e colegas do Setor de Pedologia, pelo companheirismo, descontração e amizade.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Física do Solo, pelos momentos de trabalho, amizade e descontração, Adão Leonel M. Corcini, André A. Brandt, Carlos A. Streck, Cláudia Alessandra P. de Barros, Davi Alexandre Vieira, David P. da Rosa, Douglas R. Kaiser, Eracilda Fontanella, Fabiano de V.A. Braga, Flávio Fontinelli, Juliana Prevedello, Leandro Dalbianco, Leonir Teresinha Uhde, Letícia Sequinatto, Marcelo I. Mentges, Marcelo Kunz, Maurício Kunz, Miriam Fernanda Rodrigues, Paulo I. Gubiani, Vanderléia Trevisan e Vinícius Hilbig.

Aos amigos Federico U. Barreto, Marlene C. Alves e Michele Dubow, pelos momentos de descontração, companheirismo e amizade.

Aos amigos e colegas, os de perto e os de longe, que me incentivaram e me acompanharam em mais uma etapa da minha vida.

À minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando e incentivando, nunca deixando que eu desistisse dos meus objetivos.

À todos vocês, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Universidade Federal de Santa Maria

QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO SOB FLORESTA E PASTAGEM NO SUL DO BRASIL

AUTOR: LUIS EDUARDO AKIYOSHI SANCHES SUZUKI

ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de março de 2008.

A compactação é um problema que tem sido verificado nos diferentes sistemas de manejo do solo: agrícola, pecuária e florestal. Na área agrícola a compactação tem sido documentada, enquanto na pecuária e florestal os estudos ainda são incipientes. Com o objetivo de avaliar a qualidade físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem no Sul do Brasil, e estabelecer parâmetros e valores indicadores de qualidade do solo, realizou-se um estudo no município de Butiá, situado na região fisiográfica Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense) do Estado do Rio Grande do Sul, sob um Argissolo Vermelho distrófico. Foram utilizadas quatro áreas: floresta antropizada constituída por espécies arbóreas e arbustivas; pastagem implantada há 5 anos sob preparo convencional e constituída do consórcio de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium sp.*); povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento no ano de 1986; e plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2ª rotação com 4,5 anos de idade, sendo a colheita do eucalipto no primeiro corte, aos 8,5 anos de idade, feita manualmente com motosserra e a extração da madeira realizada com Forwarder. Foram avaliadas propriedades físicas (densidade, porosidade, agregação do solo, permeabilidade ao ar e parâmetro S), hídricas (condutividade hidráulica do solo saturado e curva de retenção de água) e mecânicas (resistência à penetração, grau de compactação e compressibilidade) do solo. A profundidade de compactação em área de pastagem é até 0,10 m, enquanto em área de colheita mecanizada de eucalipto pode alcançar 0,40 m, sendo necessários canais permanentes de tráfego para minimizar a compactação em áreas florestais. Os valores críticos de propriedades físicas do solo para o crescimento e rendimento de culturas anuais também parece ser efetivo para culturas perenes e pastagem. Com aumento da compactação há compressão dos agregados do solo, incrementando a densidade e reduzindo a porosidade, afetando negativamente os fluxos de ar e água do solo. Níveis intermediários de compactação são favoráveis ao meio ambiente e, possivelmente, ao crescimento de plantas, devido à melhor estrutura do solo (porosidade e densidade) e ao maior armazenamento e disponibilidade de água, além de ser mais eficiente quanto à deformação e suscetibilidade do solo à compactação. Através de propriedades como a densidade do solo, resistência do solo à penetração e umidade é possível estimar a capacidade de suporte de carga do solo e sua suscetibilidade à compactação. Os poros biológicos, formados pela ação de organismos do solo e decomposição de raízes, são efetivos no incremento do fluxo de ar, sendo fundamentais na infiltração de água e fluxo de ar em condições de elevada densidade do solo. Para obtenção de uma densidade referência do solo para cálculo do grau de compactação em áreas de floresta e pastagem, a coleta de amostras com estrutura preservada deve ser feita na camada de 0,10 – 0,125 m, equilibradas na tensão de 33 kPa, e o valor de densidade referência deve ser aquele obtido na pressão de 1600 kPa.

Palavras-chave: compactação, compressibilidade, qualidade do solo, estrutura do solo, floresta de eucalipto

ABSTRACT

Doctorate Thesis

Graduate Program in Forest Engineering

Federal University of Santa Maria

PHYSICO-HYDRIC QUALITY OF A HAPLUDALF UNDER FOREST AND PASTURE IN SOUTH BRAZIL

AUTHOR: LUIS EDUARDO AKIYOSHI SANCHES SUZUKI

ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT

Place and Date of Defense: Santa Maria, March 27, 2008.

Soil compaction is a problem in different production systems: agriculture, pasture and forest. In the agriculture soil compaction is well documented, while in the pasture and forest its study is scarce. The objective of this study was to evaluate the physical-hydric quality of an Alfisol under forest and pasture in South Brazil, and establish parameters and values indicative of soil quality. The study was carried out in Butiá county, located in the physiographic region of “Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense)” in the “Rio Grande do Sul” state. Four areas were studied: native forest; five-years old pasture, installed under conventional tillage and constituted of *Brachiaria brizantha* associated with *Paspalum lourai* and *Trifolium sp.*; 20-years old *Eucalyptus saligna*, installed under conventional tillage in 1986; 4.5-years old *Eucalyptus saligna* in second cycle, where the first cycle was cut 8.5 years after installed. manually and carried out with forwarder. Soil physical properties (bulk density, soil porosity, soil aggregation, air permeability and parameter S), hydrical properties (hydraulic conductivity and soil water retention curve) and mechanical properties (soil penetrations resistance, degree of compactness and compressibility) of soil were evaluated. The depth of soil compaction in the pasture is around 0.10 m, while in the mechanized harvest of eucalyptus may reach 0,40 m, which indicates the need for permanent controlled traffic to minimize soil compaction in forest areas. The critical values of soil physical properties to the growth and yield of annual crops looks effective for perennial and pasture crops. With the increment of soil compaction there is compression of soil aggregates, increase of bulk density and decrease of soil porosity, affecting negatively the fluxes of air and water of soil. Intermediate levels of soil compaction are favorable to the environment, and probably to the plant growth, due to the better soil structure (porosity and bulk density) and greater water availability, along with more efficient to the deformations and susceptibility to compaction. Using bulk density, soil penetration resistance and soil moisture, it is possible to estimate the soil load support ability and its susceptibility to compaction. Biological pores, formed by the action of soil organisms and root decomposition, are effective to increment air flux, fundamental to water infiltration and air flux under conditions of high bulk density. To obtain the reference bulk density to calculate the degree of compactness in forest and pasture, the soil with preserved structure must be sampled in the layer of 0.10 – 0.125 m, equilibrated under tension of 33 kPa and the reference bulk density must be that obtained from pressure of 1600 kPa.

Key words: compaction, compressibility, soil quality, soil structure, forest of eucalyptus

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1: Caracterização físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem

- Figura 1 – Localização do município de Butiá no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Butiá (Rio Grande do Sul) (2008)..... 24
- Figura 2 - Perfil do Argissolo Vermelho distrófico..... 25
- Figura 3 – Área da floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d)..... 27
- Figura 4 - Escarificador de três hastes utilizado no preparo do solo para implantação do eucalipto 4,5. Foto cedida gentilmente por Aracruz Celulose..... 27
- Figura 5 - Imagem das áreas de coleta. Fonte: Imagem do Google Earth de 06/09/2005. Acesso em 11/03/2008..... 28
- Figura 6 – Algumas das etapas da coleta de amostra com estrutura alterada (a, b, c) e preservada (d, e, f). 29
- Figura 7 – Valores observados (representados pelos símbolos) e estimados (representados pela linha cheia) da curva característica de retenção de água nas camadas de 0,025 a 0,05 m (a), 0,10 a 0,125 m (b) e 0,20 a 0,225 m (c) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 49

Capítulo 2: Compressibilidade de um Argissolo sob floresta e pastagem

- Figura 8 – Relações entre densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial (D_{si}) e densidade (D_{Sf}) (a) e deformação (Def) (b) do solo ao final do teste de compressão uniaxial, pressão de preconsolidação (σ_p) (c) e índice de compressão (C_c) (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. * significativo a 5%; ** significativo a 1%. 84
- Figura 9 – Relações entre resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo de Busscher (1990) e densidade (D_{Sf}) (a) e deformação (Def) (b) do solo ao final do teste de compressão uniaxial, pressão de preconsolidação (σ_p) (c) e índice de compressão (C_c) (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. * significativo a 5%..... 85
- Figura 10 – Relações entre deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Def) (a, b) e umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (θ_{33kPa}) (c, d) com pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (C_c) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. ** significativo a 1%. 86
- Figura 11 – Relações entre teor de silte e argila com pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (C_c) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. 88

Capítulo 3: Densidade referência e grau de compactação de um Argissolo sob floresta e pastagem

- Figura 12 – Relação entre teor de argila e densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial (DS_i , $Mg\ m^{-3}$) e ao final do teste de compressão uniaxial (DS_f , $Mg\ m^{-3}$), para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 103
- Figura 13 – Relação entre grau de compactação e pressão aplicada no teste de compressão uniaxial para a floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 104
- Figura 14 – Relação entre areia (a), silte (b) e argila (c) com o grau de compactação do solo calculado pela densidade referência de 1600 kPa ($DS_{ref\ 1600\ kPa}$) no teste de compressão uniaxial no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 106
- Figura 15 – Relação entre grau de compactação (GC) calculado pela densidade referência obtida na pressão de 1600 kPa ($DS_{ref\ 1600\ kPa}$) no teste de compressão uniaxial e macroporosidade (Macro) (a), microporosidade (Micro) (b), porosidade total (PT) (c) e condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta S}$) (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 110

Capítulo 4: Efeito da estrutura do solo no comportamento compressivo e na permeabilidade ao ar de um Argissolo

- Figura 16 – Algumas etapas do preparo das amostras com estrutura não preservada: amostra com estrutura preservada após ser retirada da estufa (a); retirada da amostra do cilindro (b); amostra sem estrutura peneirada em peneira de abertura de 2 mm (c); preparo do cilindro para receber a amostra sem estrutura (d); montagem do cilindro com amostra sem estrutura (e); saturação com água das amostras com estrutura não preservada (f)..... 120
- Figura 17 – Curva de compressão do solo para amostras com estrutura do solo preservada e alterada para a camada de 0,025 a 0,05 m e para os usos floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 124
- Figura 18 – Curva de compressão do solo para amostras com estrutura do solo preservada e alterada para a camada de 0,10 a 0,125 m e para os usos floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 125

- Figura 19 – Curva de compressão do solo para amostras com estrutura do solo preservada e alterada para a camada de 0,20 a 0,225 m e para os usos floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 126
- Figura 20 – Relações entre teor de areia total (a), silte (b) e argila (c) com permeabilidade ao ar (PAA) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. 127
- Figura 21 – Relações entre densidade do solo (DSi) (a), macroporosidade (b) e microporosidade (c) com permeabilidade ao ar (PAA) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS 128
- Figura 22 – Relações entre grau de compactação (GC) com pressão de preconsolidação (σ_p) (a) e índice de compressão (C_c) (b) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 129
- Figura 23 – Relações entre teor de areia total (a), silte (b) e argila (c) com pressão de preconsolidação (σ_p) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. 130
- Figura 24 – Relações entre teor de areia total (a), silte (b) e argila (c) com índice de compressão (C_c) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 131

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1: Caracterização físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Médias de cascalho*, areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila para as áreas e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 30 |
| Tabela 2 – Carbono orgânico total (g dm^{-3}) para as áreas e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. Fonte: Antunes (2007)..... | 31 |
| Tabela 3 - Valores médios de densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica para os usos e camadas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 34 |
| Tabela 4 - Valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados para os usos e camadas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 35 |
| Tabela 5 - Contrastes ortogonais e significância para os usos e camadas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 36 |
| Tabela 6 - Contrastes ortogonais e significância para as camadas de solo na área de floresta e pastagem no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 37 |
| Tabela 7 - Contrastes ortogonais e significância para as camadas de solo na área de eucalipto 20 e eucalipto 4,5 no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 39 |
| Tabela 8 – Equações relacionando algumas propriedades físicas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 40 |
| Tabela 9 – Coeficientes de correlação de Pearson entre o diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados e algumas propriedades físicas e matéria orgânica do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 43 |
| Tabela 10 – Valores médios dos parâmetros de ajuste da curva de retenção de água e parâmetro S para cada tratamento e camada do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 48 |
| Tabela 11 - Contrastes ortogonais e significância para as umidades volumétricas estimadas nas tensões da curva característica de retenção de água no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 50 |
| Tabela 12 – Água disponível estimada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) para os diferentes usos no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 50 |
| Tabela 13 - Valores médios do parâmetro S para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 51 |

| | |
|--|----|
| Tabela 14 - Contrastes ortogonais e significância para o parâmetro S no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 52 |
|--|----|

Capítulo 2: Compressibilidade de um Argissolo sob floresta e pastagem

| | |
|---|----|
| Tabela 15 - Valores médios de θ_i , GSi, PAA e Def para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 70 |
| Tabela 16 - Valores médios de DSi, DSf, σ_p e Cc para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 72 |
| Tabela 17 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,025-0,05 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 73 |
| Tabela 18 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,025-0,05 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 74 |
| Tabela 19 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,10-0,125 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 75 |
| Tabela 20 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,10-0,125 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 75 |
| Tabela 21 - Contrastes ortogonais, valor de F e significância para os usos em estudo na camada de 0,20-0,225 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. | 76 |
| Tabela 22 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,20-0,225 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 76 |
| Tabela 23 - Médias, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) da umidade volumétrica (θ_{RP} , $m^3 m^{-3}$), densidade (DS_{RP} , $Mg m^{-3}$) e resistência à penetração (RP) das camadas de 0,025-0,05 m, 0,10-0,125 m e 0,20-0,225 m, utilizadas no ajuste do modelo (Busscher, 1990)..... | 78 |
| Tabela 24 - Parâmetros empíricos de ajuste do modelo (Busscher, 1990) para os usos em estudo..... | 78 |
| Tabela 25 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para a Floresta. | 79 |
| Tabela 26 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para a Pastagem..... | 80 |
| Tabela 27 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para o Eucalipto 20..... | 81 |

Tabela 28 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para o Eucalipto 4,5..... 82

Tabela 29 – Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físicos e mecânicos do solo. 83

Capítulo 3: Densidade referência e grau de compactação de um Argissolo sob floresta e pastagem

Tabela 30 – Valores médios das densidades obtidas antes (DS) e após a aplicação das cargas de 200 kPa (DSref_{200 kPa}), 400 kPa (DSref_{400 kPa}), 800 kPa (DSref_{800 kPa}) e 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 100

Tabela 31 - Contrastes ortogonais e significância para as densidades obtidas antes (DS) e após a aplicação das cargas de 200 kPa (DSref_{200 kPa}), 400 kPa (DSref_{400 kPa}), 800 kPa (DSref_{800 kPa}) e 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 101

Tabela 32 - Contrastes ortogonais, valor de F e significância para as densidades obtidas antes (DS) e após a aplicação das cargas de 200 kPa (DSref_{200 kPa}), 400 kPa (DSref_{400 kPa}), 800 kPa (DSref_{800 kPa}) e 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... 102

Tabela 33 – Valores médios de grau de compactação do solo calculado pela densidade referência obtida na pressão de 200 kPa (GC_{200 kPa}), 400 kPa (GC_{400 kPa}), 800 kPa (GC_{800 kPa}) e 1600 kPa (GC_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. 105

Tabela 34 - Contrastes ortogonais e significância para a variável grau de compactação do solo calculado pela densidade referência obtida na pressão de 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. 107

Tabela 35 - Contrastes ortogonais e significância para a variável grau de compactação do solo calculado pela densidade referência obtida na pressão de 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. 108

Capítulo 4: Efeito da estrutura do solo no comportamento compressivo e na permeabilidade ao ar de um Argissolo

| | |
|---|-----|
| Tabela 36 – Valores médios de macroporosidade, microporosidade e porosidade total considerando amostra de solo com estrutura preservada e alterada para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 121 |
| Tabela 37 – Valores médios de permeabilidade ao ar, grau de saturação inicial e deformação do solo considerando amostra de solo com estrutura preservada e alterada para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 122 |
| Tabela 38 – Valores médios de pressão de preconsolidação e índice de compressão considerando amostra de solo com estrutura preservada e alterada para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS..... | 123 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. Introdução geral | 17 |
| 2. Hipóteses | 19 |
| 3. Objetivo geral | 20 |
| 4. Capítulo 1: Caracterização físico-hídrica de um Argissolo sob floresta e pastagem | 21 |
| 4.1. Introdução | 21 |
| 4.2. Material e métodos | 24 |
| 4.2.1. Descrição das áreas de estudo | 24 |
| 4.2.2. Coleta de amostras | 28 |
| 4.2.3. Determinações | 29 |
| 4.3. Resultados e discussão..... | 33 |
| 4.4. Conclusões..... | 54 |
| 4.5. Referências | 55 |
| 5. Capítulo 2: Compressibilidade de um Argissolo sob floresta e pastagem | 63 |
| 5.1. Introdução | 63 |
| 5.2. Material e métodos | 65 |
| 5.2.1. Descrição das áreas de estudo | 65 |
| 5.2.2. Coleta de amostras | 66 |
| 5.2.3. Compressibilidade | 67 |
| 5.2.4. Permeabilidade ao ar | 67 |
| 5.2.5. Porosidade, densidade e condutividade hidráulica do solo saturado..... | 68 |
| 5.2.6. Diâmetro médio ponderado (dmp) de agregados | 68 |
| 5.2.7. Resistência do solo à penetração | 68 |
| 5.2.8. Análise estatística | 69 |
| 5.3. Resultados e discussão..... | 69 |
| 5.3.1. Compressibilidade dos diferentes usos do solo | 69 |
| 5.3.2. Estimativa da compressibilidade através de propriedades físicas do solo..... | 77 |
| 5.4. Conclusões..... | 88 |
| 5.5. Referências | 89 |
| 6. Capítulo 3: Densidade referência e grau de compactação de um Argissolo sob floresta e pastagem | 95 |
| 6.1. Introdução | 95 |
| 6.2. Material e métodos | 97 |

| | |
|--|-----|
| 6.3. Resultados e discussão..... | 99 |
| 6.4. Conclusões..... | 111 |
| 6.5. Referências | 111 |
| 7. Capítulo 4: Efeito da estrutura do solo no comportamento compressivo e na permeabilidade ao ar de um Argissolo..... | 115 |
| 7.1. Introdução..... | 115 |
| 7.2. Material e métodos | 116 |
| 7.2.1. Descrição das áreas de estudo | 116 |
| 7.2.2. Coleta de amostras..... | 117 |
| 7.2.3. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total..... | 117 |
| 7.2.4. Permeabilidade ao ar | 117 |
| 7.2.5. Compressibilidade | 118 |
| 7.2.6. Grau de compactação..... | 118 |
| 7.2.7. Densidade de partículas..... | 119 |
| 7.2.8. Estrutura alterada..... | 119 |
| 7.2.9. Delineamento experimental e análise estatística | 119 |
| 7.3. Resultados e discussão..... | 120 |
| 7.4. Conclusões..... | 131 |
| 7.5. Referências | 132 |
| 8. Considerações finais | 135 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

O estudo de diferentes usos do solo e seus impactos no meio ambiente tem sido o grande desafio no meio científico. Identificar os melhores parâmetros para detectar tais impactos e quantificá-los não é uma tarefa fácil, pois o ambiente é dinâmico e está em constante modificação, tanto pela ação humana quanto natural.

Quando se fala em qualidade do solo, busca-se um ambiente favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas e, conseqüentemente, o alcance de elevadas produtividades. Concomitantemente, espera-se que esse ambiente favorável às plantas seja estável, como em suas condições naturais.

A qualidade do solo tem sido estudada tendo a planta como resposta aos indicadores de qualidade, principalmente em áreas agrícolas. Quando se consideram áreas florestais, a resposta das plantas aos indicadores não é tão simples, pois, diferentemente das culturas anuais, as árvores apresentam um ciclo mais longo, estando sujeitas às variações climáticas e de ação antrópica durante vários anos. Para as áreas florestais, uma alternativa talvez seja o estudo de indicadores relacionados ao ambiente, mas que apresentem relação com o crescimento e desenvolvimento de plantas. Muitos dos indicadores e resultados obtidos em áreas agrícolas que apresentam relações com a planta, meio ambiente e qualidade do solo auxiliarão e servirão como embasamento para os estudos em áreas florestais.

De acordo com dados de 2006 da Associação Brasileira de Celulose e Papel, dos 280,60 mil km² do Estado do Rio Grande do Sul, 0,77 mil km² estão reflorestados, e para os próximos anos espera-se um incremento das áreas reflorestadas, aumentando a importância do setor florestal para o estado.

No entanto, assim como outros sistemas de manejo, o manejo florestal tem contribuído para degradação do solo. Geralmente, quando há a interferência antrópica em um ambiente natural ocorrem alterações negativas nesse meio, havendo prejuízos não apenas local, mas difuso. Sistemas de manejo que melhorem ou pelo menos mantenham as condições naturais têm sido estudados e valores críticos para o crescimento, desenvolvimento e produtividade de plantas e qualidade do solo têm sido buscados incessantemente pelos pesquisadores.

Considera-se que o ambiente sem ação antrópica esteja estável, com perdas e ganhos, mas sem prejuízos ao meio local. Portanto, será que os valores críticos não deveriam ter como

referência esses ambientes? E será que os valores obtidos nesses ambientes são favoráveis às plantas cultivadas?

Muitas lacunas ainda existem em relação aos valores críticos para o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como valores a serem considerados para avaliação da qualidade do solo e do meio ambiente. Os valores críticos devem estar relacionados não apenas com o crescimento e desenvolvimento das plantas, mas devem incluir o meio ambiente no contexto. Muitos resultados obtidos localmente são utilizados para outras situações, mas nem sempre com os mesmos resultados. Essa não é uma tarefa fácil, pois muitas são as variáveis de difícil controle, como as condições climáticas e a diversidade de solos.

Alguns parâmetros são muito eficientes em detectar alterações no solo ocasionadas pelo seu manejo, podendo ser indicadores eficientes na avaliação da qualidade do solo. Porém, eles podem ser difíceis de medir, dificultando sua maior utilização. Uma alternativa seria relacioná-los com outro parâmetro de quantificação mais fácil, e estimar esse parâmetro de difícil obtenção pelas funções de pedotransferência, que são funções preditivas de determinadas propriedades do solo a partir de outras mais facilmente medidas e de menor custo.

Os indicadores de qualidade do solo devem estar relacionados, ou seja, quando um parâmetro é limitante, outros parâmetros também devem ser afetados.

Manter a qualidade do solo é difícil, principalmente em um ambiente produtivista; contudo, medidas preventivas para evitar a degradação do solo devem ser buscadas.

2. HIPÓTESES

O uso do solo altera suas características físico-hídricas em relação à floresta antropizada.

Sob maior tempo de instalação da cultura do eucalipto, o solo recupera suas características físico-hídricas, com semelhança à floresta antropizada.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade estrutural de um Argissolo sob eucalipto e pastagem no Sul do Brasil em relação à floresta antropizada, e estabelecer parâmetros e valores indicadores de qualidade do solo.

4. CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO SOB FLORESTA E PASTAGEM

4.1. Introdução

A compactação do solo tem sido constatada nos diferentes sistemas de manejo: plantio direto (Genro Junior et al., 2004; Silva, 2003; Suzuki, 2005), plantio convencional (Stone & Silveira, 1999; Silva et al., 2003; Alves & Suzuki, 2004), pastagem (Collares, 2005; LanzaNova, 2005) e silvicultura (Fernandes & Vitória, 1998; Fernandes & Souza, 2003). Em áreas agrícolas esse problema tem sido extensivamente estudado, mas em áreas sob silvicultura ainda há poucas informações (Fernandes & Souza, 2001). Greacen & Sands (1980) abordaram em uma revisão a compactação em solos florestais, enquanto Seixas (1988) descreveu brevemente as causas, efeitos e práticas de controle da compactação causada pela mecanização florestal. Valores críticos ou restritivos ao crescimento de culturas anuais têm sido sugeridos mas em culturas perenes, como eucalipto, ainda não se tem sugestões. A dificuldade na obtenção desses valores para culturas perenes é o longo ciclo dessas culturas e um sistema radicular mais volumoso e extenso.

De acordo com Fernandes & Vitória (1998), trabalhos que evidenciam a compactação do solo em função do uso intensivo de máquinas agrícolas vêm sendo continuamente realizados; entretanto, do ponto de vista florestal, a situação no Brasil difere bastante das explorações agrícolas, uma vez que os trabalhos conduzidos especificamente nessa linha de pesquisa são, de certa forma, escassos.

A exploração florestal, segundo Martins et al. (1998), é um termo utilizado para definir um conjunto de operações, que se inicia com a abertura de acesso à floresta e termina com o transporte das árvores para as unidades de processamento. Tais operações podem afetar vários componentes do ecossistema, acarretando danos como a compactação do solo, a erosão e os prejuízos à vegetação, o que modifica o meio físico em diferentes escalas de intensidade.

A mecanização tem sido a responsável pela deterioração mais rápida das condições físicas do solo, pois o tráfego excessivo sem o controle das condições adequadas do solo para

o tráfego contribui para a compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo exagerado número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo (Beltrame & Taylor, 1980), quando a carga aplicada for superior à capacidade de suporte do solo (Silva et al., 2000a; Lima et al., 2006; Veiga et al., 2007). A mecanização tem sido uma constante e responsável pela deterioração do solo não apenas na agricultura, mas em áreas florestais o uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas tem aumentado.

A mecanização, quer seja de áreas agrícolas ou florestais, parece ser a principal causa da compactação dos solos, tanto pelo revolvimento do solo como pelo tráfego (Reichert et al., 2007), determinando as relações entre ar, água e temperatura do solo, que influenciam diretamente na germinação, a brotação e a emergência das plantas, no crescimento e no desenvolvimento das raízes e plantas (Letey, 1985; Silva et al., 1994).

Para o transporte das árvores após sua derrubada são utilizados Skidders ou Forwarders e, nessas operações, o solo e a vegetação são afetados. A compactação causada pelo tráfego altera as propriedades físicas do solo, afetando a regeneração natural das espécies, em consequência das modificações que provoca no ambiente radicular. A longo prazo, as modificações provocadas durante as operações de manejo florestal alteram a qualidade do sítio florestal (Martins et al., 1998).

A compactação em solos florestais é mais complexa do que nos demais manejos, pois as raízes das árvores permanecem e aplicam forças mecânicas por longos períodos de tempo comparado às culturas anuais; a compactação causada pelas operações mecanizadas é elevada; a derrubada de grandes árvores impõe carga única no solo; as máquinas utilizadas na colheita podem ser muito pesadas e combinadas com o arraste e levantamento dos troncos, podem exercer grandes pressões no solo; algumas operações de colheita, como o corte e arraste, podem perturbar o solo; a compactação pode afetar a qualidade da água (Greacen & Sands, 1980). Somado a isso, os solos (Braidá, 2004; Silva et al., 2006a; Silva et al., 2006b) e as culturas (Foloni et al., 2006) respondem diferentemente à compactação.

Tem-se verificado, portanto, uma degradação da qualidade do solo, causada pelas práticas inadequadas de manejo. Larson & Pierce (1994) afirmam que a qualidade do solo é uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas, que fornece os meios para a produção vegetal e animal, regula o fluxo de água no ambiente e atua como um filtro ambiental na atenuação e degradação de componentes ambientalmente danosos ou perigosos. A qualidade do solo, do ponto de vista físico, está associada aquele solo que: a) permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície; b)

responde ao manejo e resiste à degradação; c) permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; e d) possibilita o crescimento das raízes (Reichert et al., 2003).

A degradação da qualidade do solo pode afetar vários fatores ambientais. Em relação à atmosfera, a compactação influenciando na aeração e permeabilidade do solo e desenvolvimento das culturas pode alterar o fluxo de gases do solo para a atmosfera e vice-versa. A compactação pode resultar em redução da taxa de infiltração e aumento do escoamento superficial, contribuindo para poluição da água superficial. Onde a concentração de nitrato excede a capacidade com que a planta pode absorver, como pode ocorrer em solos compactados que limitam o crescimento radicular, o excesso pode lixiviar para águas subsuperficiais ou ser perdido por desnitrificação. Em termos de recursos do solo, a compactação pode alterar todos os aspectos físicos, químicos e biológicos do solo (Soane & van Ouwerkerk, 1995). Nesse sentido, manter e melhorar a qualidade do solo é essencial para que ele atue como um purificador e armazenador de água, pois toda a água que chega ao solo terá um destino, quer seja infiltrando até alcançar as águas subterrâneas ou escoando superficialmente, podendo assorear os rios e lagos quando há erosão.

Fazendo um breve relato da evolução dos estudos sobre compactação em áreas agrícolas, de modo geral as pesquisas limitavam-se à comparação de manejos com alguma área referência, como uma mata, campo ou floresta nativa (Gomes et al., 1978; Cintra et al., 1983; Silva et al., 1986; Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Cavenage et al., 1999; Alves et al., 2005). Com o surgimento do plantio direto, os trabalhos passaram a comparar os sistemas de preparo do solo como cultivo mínimo e convencional, com o plantio direto (Albuquerque et al., 1995; De Maria et al., 1999; Alves & Suzuki, 2004; Suzuki & Alves, 2004; Lima et al., 2006). Atualmente, os trabalhos buscam valores considerados críticos, limitantes ou restritivos ao crescimento das plantas, e não apenas a comparação de sistemas de manejo (Genro Junior, 2002; Reichert et al., 2003; Secco et al., 2004; Reichert et al., 2007).

Nesse sentido, uma possibilidade de avaliar a qualidade do solo para o crescimento das espécies perenes seria a comparação das áreas de culturas perenes com áreas que ainda não sofreram ação antrópica, como uma mata, ou utilizar os valores já existentes na literatura para culturas anuais e aplicá-los para culturas perenes.

O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade físico-hídrica de um Argissolo Vermelho distrófico sob floresta e pastagem.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Descrição das áreas de estudo

A área de estudo está localizada no município de Butiá, situado na região fisiográfica Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense) do Estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 30°06'06" de latitude Sul e 51°52'18" de longitude Oeste (Figura 1).

Pelo sistema de Köppen o clima da região é do tipo “Cfa” – Clima Subtropical, úmido, sem estiagem. A temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C e a do mês menos quente é de 3 a 18 °C.

O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2006) Tb A moderado textura média/argilosa com cascalhos relevo suave ondulado e ondulado e substrato granito (Figura 2).

A descrição morfológica do solo, realizada por Raphael David dos Santos e Edésio Paulo Bortolas, é apresentada a seguir:



Figura 1 – Localização do município de Butiá no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Butiá (Rio Grande do Sul) (2008).



Figura 2 - Perfil do Argissolo Vermelho distrófico .

Perfil: 12

Data: 19/02/1999

Classificação: Argissolo Vermelho distrófico tb a moderado textura média/argilosa com cascalhos relevo suave ondulado e ondulado.

Localização: horto colorado. Talhão 81.

Litologia: granitos.

Formação geológica: cinturão Dom Feliciano.

Cronologia: cambriano.

Relevo local: ondulado.

Relevo regional: suave ondulado.

Drenagem: bem drenado.

Erosão: moderada.

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Uso atual: reflorestamento com plantio de eucaliptos.

Clima: subtropical Cfa (Köppen), úmido, sem estiagem.

Descrito e coletado por: Raphael David dos Santos e Edésio Paulo Bortolas.

Descrição morfológica

- A₁ 0 – 16 cm; vermelho-escuro (2,5YR, 3/3, úmida); franco-argilo arenosa; fraca pequena e média blocos subangulares; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição gradual e plana.
- AB 16 – 28 cm; vermelho-escuro (2,5YR 3/6, úmida); franco-argilosa; fraca pequena e média blocos subangulares; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição gradual e plana.
- Bt₁ 28 – 47 cm; bruno-avermelhado (2,5YR 4/4, úmida); argila; fraca pequena e média blocos subangulares; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; transição difusa e plana.
- Bt₂ 47 – 76 cm; bruno-avermelhado (2,5YR 4/5, úmida); argila com cascalhos; fraca/moderada média blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição gradual e ondulada.
- Bt₃ 76 – 88 cm; vermelho (2,5YR 4/6, úmida); argila cascalhenta; fraca/moderada média blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição gradual e ondulada.
- BC 88 – 120 cm; vermelho (2,5YR 4/6, úmida); mosqueado comum pequeno e proeminente amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida); franco-argilosa cascalhenta; fraca pequena e média blocos subangulares; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição clara e ondulada.
- C 120 – 160 cm; coloração variegada vermelho (2,5YR 4/6, úmida); amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida); bruno-muito claro-acinzentado (10YR 6/6, úmida) e vermelho (2,5YR 5/6, úmida); franco-argilossiltosa; muito dura, firme, plástica e pegajosa.

Os usos e suas características foram os seguintes:

a) Floresta: floresta antropizada constituída por espécies arbóreas e arbustivas com altura de aproximadamente quatro metros, utilizada como abrigo pelos bovinos (Figura 3a).

b) Pastagem: pastagem com cinco anos de idade, constituída de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium sp.*). A pastagem foi instalada em uma área de 1200 ha⁻¹ sob preparo convencional no ano de 2001 (Figura 3b). Anterior ao plantio da pastagem a área foi constituída por floresta natural e em seguida foi utilizada com pastagem e soja.

c) Eucalipto 20: povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento no ano de 1986 (Figura 3c). Anterior ao plantio do eucalipto a área foi constituída por pastagem.

d) Eucalipto 4,5: plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2ª rotação, com 4,5 anos de idade. O plantio original ocorreu em 1993, com preparo do solo em faixa e escarificador de três hastes (Figura 4). A colheita do eucalipto no primeiro corte, aos 8,5 anos de idade, foi feita manualmente com motosserra e a extração da madeira realizada com Forwarder Valmet 890 com capacidade de carga de 18 Mg, sem queima do resíduo vegetal. O tráfego para colheita do eucalipto no primeiro corte foi aleatório, com número de passadas podendo chegar a 16. O segundo plantio foi feito nas entrelinhas no ano de 2002 (Figura 3d). Anterior ao plantio original ocorrido em 1993, a área foi utilizada com soja e pastagem.

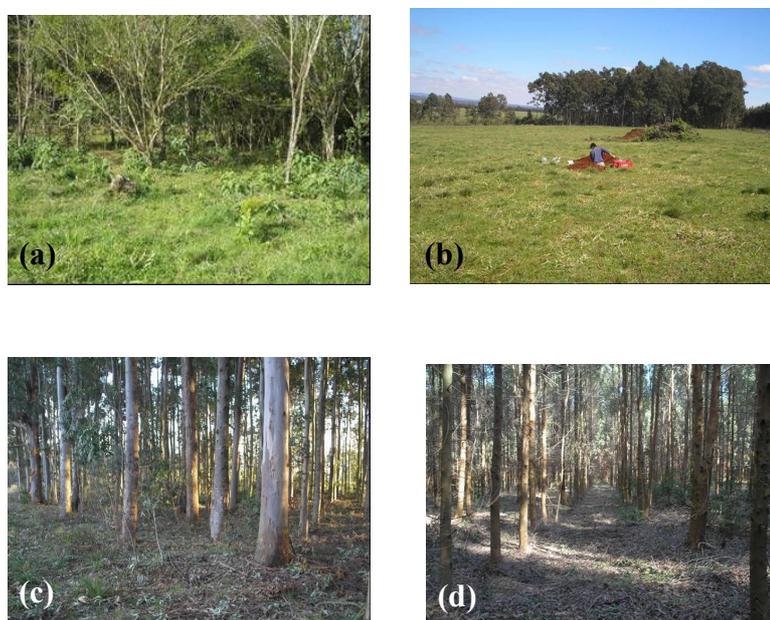


Figura 3 – Área da floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d).



Figura 4 - Escarificador de três hastes utilizado no preparo do solo para implantação do eucalipto 4,5. Foto cedida gentilmente por Aracruz Celulose.

4.2.2. Coleta de amostras

As áreas de coleta foram localizadas próximas uma da outra para reduzir a variabilidade do relevo ondulado (Figura 5). Os pontos de coleta das áreas sob floresta, pastagem e eucalipto 20 estavam em uma altitude de aproximadamente 126 m, enquanto a área de eucalipto 4,5 em uma altitude de aproximadamente 140 m. Na floresta as coletas foram realizadas em um ponto de difícil acesso aos animais devido à arquitetura das espécies arbóreas e arbustivas; contudo, devido à possibilidade dos bovinos conseguirem ter acesso a esse ponto de coleta nos períodos mais secos, essa área foi denominada de floresta antropizada. No eucalipto 4,5 as coletas foram feitas na entrelinha da 1ª e 2ª rotação, entre quatro árvores.

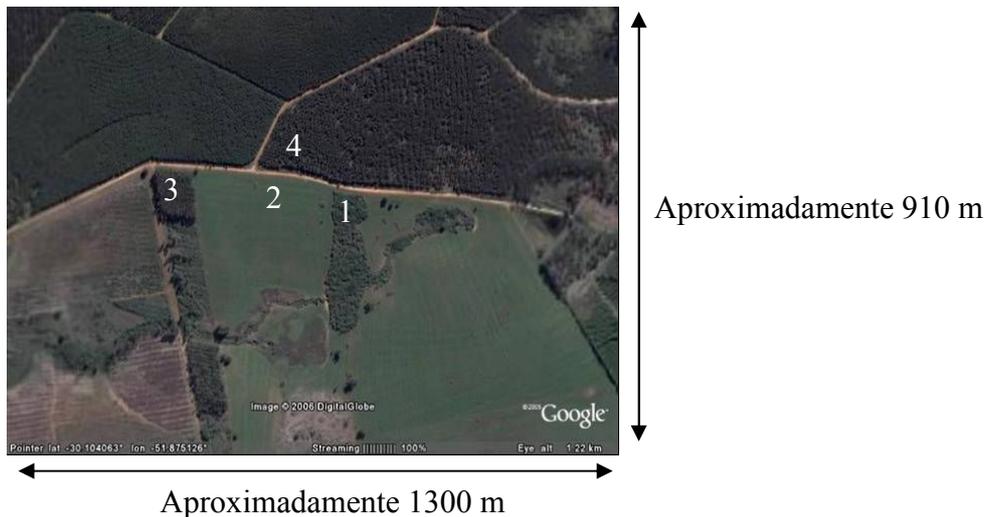


Figura 5 - Imagem das áreas de coleta. Fonte: Imagem do Google Earth de 06/09/2005. Acesso em 11/03/2008. 1 = Floresta; 2 = Pastagem; 3 = Eucalipto 20; 4 = Eucalipto 4,5.

No mês de setembro do ano de 2006 foram realizadas as coletas de amostras com estrutura alterada (Figuras 6a, b, c) e preservada (Figuras 6d, e, f), onde foram abertas três trincheiras para coleta nas camadas de 0,00 - 0,05; 0,05 - 0,10; 0,10 - 0,20; 0,20 - 0,40; 0,40 - 0,60 e 0,60 - 1,00 m.

A coleta de amostras com estrutura alterada foi realizada nas três trincheiras dentro de cada área do tratamento. No laboratório, para cada trincheira foram feitas duas repetições, totalizando seis repetições para cada tratamento.

Para as amostras com estrutura preservada coletaram-se em cada trincheira duas amostras por camada de solo, totalizando seis repetições por camada. As amostras foram coletadas no centro da camada em cilindros com 5,0 cm de altura e 2,5 cm de diâmetro.

Também foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros de 2,5 cm de altura e 6,1 cm de diâmetro, nas camadas de 0,025 - 0,05; 0,10 - 0,125 e 0,20 - 0,225 m, para determinação da curva e retenção de água e cálculo da água disponível e parâmetro S. Foram coletadas duas amostras por camada de solo, em três trincheiras por área, totalizando seis repetições.



Figura 6 – Algumas das etapas da coleta de amostra com estrutura alterada (a, b, c) e preservada (d, e, f).

4.2.3. Determinações

a) Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), utilizando amostras de solo com estrutura alterada. A dispersão das amostras de solo foi realizada por agitador horizontal com 120 rpm durante 4 horas, utilizando vidros de 100 mL contendo 20 g de solo, 10 mL de NaOH 6% (dispersante químico), 50 mL de água destilada e duas esferas de nylon com peso de 3,04 g, diâmetro de 1,71 cm e densidade de $1,11 \text{ g cm}^{-3}$

(Suzuki et al., 2004a; Suzuki et al., 2004b). A caracterização granulométrica das áreas encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Médias de cascalho*, areia total, areia grossa, areia fina, silte e argila para as áreas e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada (m) | Cascalho | Areia | | Silte | Argila | |
|--------------------|----------|-------|-------------|-------|--------|-----|
| | | Total | Grossa Fina | | | |
| g kg ⁻¹ | | | | | | |
| Floresta | | | | | | |
| 0,00 - 0,05 | 8 | 407 | 245 | 162 | 191 | 402 |
| 0,05 - 0,10 | 12 | 385 | 210 | 175 | 193 | 422 |
| 0,10 - 0,20 | 12 | 379 | 213 | 166 | 187 | 434 |
| 0,20 - 0,40 | 23 | 345 | 198 | 147 | 179 | 476 |
| 0,40 - 0,60 | 48 | 293 | 171 | 122 | 165 | 542 |
| 0,60 - 1,00 | 47 | 277 | 167 | 110 | 144 | 579 |
| Média | 25 | 348 | 201 | 147 | 176 | 476 |
| Pastagem | | | | | | |
| 0,00 - 0,05 | 38 | 362 | 206 | 156 | 193 | 445 |
| 0,05 - 0,10 | 21 | 355 | 200 | 155 | 199 | 446 |
| 0,10 - 0,20 | 36 | 334 | 193 | 141 | 185 | 481 |
| 0,20 - 0,40 | 41 | 301 | 175 | 126 | 165 | 534 |
| 0,40 - 0,60 | 75 | 300 | 186 | 114 | 137 | 563 |
| 0,60 - 1,00 | 68 | 282 | 167 | 115 | 130 | 588 |
| Média | 46 | 322 | 188 | 134 | 168 | 510 |
| Eucalipto 20 | | | | | | |
| 0,00 - 0,05 | 30 | 374 | 212 | 162 | 161 | 465 |
| 0,05 - 0,10 | 40 | 371 | 213 | 158 | 161 | 468 |
| 0,10 - 0,20 | 75 | 385 | 220 | 165 | 157 | 458 |
| 0,20 - 0,40 | 274 | 353 | 206 | 147 | 156 | 491 |
| 0,40 - 0,60 | 110 | 302 | 185 | 117 | 134 | 564 |
| 0,60 - 1,00 | 97 | 285 | 176 | 109 | 120 | 595 |
| Média | 104 | 345 | 202 | 143 | 148 | 507 |
| Eucalipto 4,5 | | | | | | |
| 0,00 - 0,05 | 14 | 475 | 272 | 203 | 200 | 325 |
| 0,05 - 0,10 | 14 | 460 | 265 | 195 | 194 | 346 |
| 0,10 - 0,20 | 19 | 426 | 240 | 186 | 192 | 382 |
| 0,20 - 0,40 | 55 | 376 | 226 | 150 | 162 | 462 |
| 0,40 - 0,60 | 47 | 314 | 188 | 126 | 151 | 535 |
| 0,60 - 1,00 | 37 | 288 | 171 | 117 | 141 | 571 |
| Média | 31 | 390 | 227 | 163 | 173 | 437 |

*Cascalho = partículas de diâmetro entre 20 – 2 mm; areia total = partículas de diâmetro entre 2 – 0,05 mm; areia grossa = partículas de diâmetro entre 2 – 0,2 mm; areia fina = partículas de diâmetro entre 0,2 – 0,05 mm; argila = partículas de diâmetro menor que 0,002 mm.

b) Carbono orgânico

As amostras com estrutura alterada foram passadas em peneira de abertura de 2 mm. Realizou-se a oxidação via seca em um Analisador Elementar modelo Flash EA 1112 Thermo Electron. O estoque de carbono orgânico total foi calculado com base em uma massa equivalente para cada camada de solo, corrigido pela densidade do solo. O teor médio de carbono das áreas em estudo é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Carbono orgânico total (g dm⁻³) para as áreas e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. Fonte: Antunes (2007).

| Camada, m | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 |
|-------------|----------|----------|--------------|---------------|
| 0,00 - 0,05 | 34 | 27 | 32 | 34 |
| 0,05 - 0,10 | 21 | 24 | 18 | 16 |
| 0,10 - 0,20 | 17 | 19 | 17 | 16 |
| 0,20 - 0,40 | 14 | 16 | 17 | 15 |
| 0,40 - 0,60 | 14 | 14 | 13 | 14 |
| 0,60 - 1,00 | 11 | 12 | 11 | 9 |

c) Diâmetro médio ponderado de agregados

Agregados de tamanho menor que 8 mm foram selecionados para determinação do diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água. Para essa determinação os agregados foram agitados em um aparelho de oscilação vertical (Yoder, 1936), com peneiras de malha de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm.

O DMP foi calculado pela seguinte equação:

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^n (mAGRi \times ci)}{\sum_{i=1}^n mtAGRi}$$

Onde: DMP = diâmetro médio ponderado do tamanho de agregados; mAGRi = massa de agregados (gramas) na classe i; ci = valor médio da classe de agregados i; mtAGRi = massa total de agregados (gramas).

d) Condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade e densidade

As amostras com estrutura preservada foram saturadas e quantificada a condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório, utilizando-se um permeâmetro de carga constante (Libardi, 2005). Em seguida, as amostras foram encaminhadas à mesa de tensão para determinação da macroporosidade, onde permaneceram por aproximadamente dois dias e, em seguida, encaminhadas à estufa por mais dois dias para determinação da microporosidade, porosidade total (EMBRAPA, 1997) e densidade do solo (Blake & Hartge, 1986).

e) Curva de retenção de água no solo

As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade e pesadas. As umidades nas tensões de 1, 6 e 10 kPa foram obtidas na mesa de tensão, enquanto as tensões de 33 e 100 kPa foram obtidas em câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). A umidade volumétrica das amostras foi obtida pela relação entre a quantidade de água retida em uma determinada tensão e o volume do cilindro de coleta.

A umidade nas tensões de 500, 1000 e 1500 kPa foram obtidas em um psicrômetro de ponto de orvalho (“dew point potentiometer”) (Decagon, 2000), utilizando amostras com estrutura alterada. A umidade volumétrica foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo.

Para ajuste da curvas característica de água no solo foi utilizado o modelo de van Genuchten (1980) pelo programa computacional SWRC (Soil Water Retention Curve) (Dourado-Neto et al., 2001), de acordo com a equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

Onde: θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r = umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ = potencial matricial (kPa); α , n , m = parâmetros de ajuste da curva de retenção de água.

f) Água disponível

O cálculo da água disponível foi feito pela umidade volumétrica entre a capacidade de campo (tensão = 10 kPa) e o ponto de murcha permanente (tensão = 1500 kPa).

g) Parâmetro S

Pela curva de retenção de água obteve-se o parâmetro S (Dexter, 2004a, 2004b, 2004c). Como se utilizou o parâmetro m como dependente ($m = 1 - 1/n$) (Mualem, 1976), o parâmetro S foi obtido pela equação:

$$S = -n (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{2n-1}{n-1} \right)^{\left(\frac{1}{n}\right)^{-2}}$$

Onde: S = parâmetro “S”; θ_r = umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); n = parâmetro de ajuste da curva de retenção de água.

Como o parâmetro S é sempre negativo, é utilizado o módulo nos resultados, como sugerido por Dexter (2004a).

4.2.4. Análise estatística

Os resultados foram analisados por contrastes ortogonais considerando 5% de significância pelo teste de Tukey. Também foi realizada a análise de regressão e análise de correlação de Pearson entre os parâmetros avaliados.

4.3. Resultados e discussão

A floresta apresentou, em relação aos demais usos, menor variação da densidade e da macroporosidade ao longo do perfil (Tabela 3). Com aumento da profundidade houve redução do DMP (Tabela 4) e de modo geral não houve diferenças entre os usos (Tabela 5).

As diferenças significativas de porosidade e densidade do solo, entre os usos, ocorreu até a camada de 0,40 m (Tabela 5), indicando que os usos interferiram mais intensamente nas camadas superiores a 0,40 m, enquanto que as camadas inferiores foram praticamente inalteradas pelo manejo aplicado (pastagem ou eucalipto). A densidade na camada de 0,00 – 0,05 m e a porosidade total na camada de 0,00 – 0,10 m na floresta diferiram das demais camadas (Tabela 6), fato que pode estar relacionado ao maior teor de matéria orgânica nessa camada (Tabela 2) e ao acúmulo de resíduos e decomposição de raízes. Lima et al. (2005) verificaram que todos os poros de uma área de floresta foram oriundos de atividade biológica.

Tabela 3 - Valores médios de densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica para os usos e camadas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada (m) | Usos | | | | Média |
|--|----------|----------|--------------|---------------|-------|
| | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | |
| Densidade do solo, Mg m ⁻³ | | | | | |
| 0,00-0,05 | 1,24 | 1,46 | 1,04 | 1,50 | 1,31 |
| 0,05-0,10 | 1,32 | 1,44 | 1,28 | 1,55 | 1,40 |
| 0,10-0,20 | 1,35 | 1,37 | 1,44 | 1,53 | 1,42 |
| 0,20-0,40 | 1,37 | 1,33 | 1,43 | 1,49 | 1,41 |
| 0,40-0,60 | 1,39 | 1,35 | 1,39 | 1,44 | 1,39 |
| 0,60-1,00 | 1,32 | 1,34 | 1,34 | 1,35 | 1,34 |
| Média | 1,33 | 1,38 | 1,32 | 1,48 | |
| Macroporosidade, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| 0,00-0,05 | 0,092 | 0,032 | 0,196 | 0,091 | 0,103 |
| 0,05-0,10 | 0,115 | 0,039 | 0,164 | 0,079 | 0,099 |
| 0,10-0,20 | 0,086 | 0,061 | 0,099 | 0,053 | 0,075 |
| 0,20-0,40 | 0,086 | 0,059 | 0,097 | 0,067 | 0,077 |
| 0,40-0,60 | 0,066 | 0,068 | 0,113 | 0,050 | 0,074 |
| 0,60-1,00 | 0,086 | 0,064 | 0,114 | 0,080 | 0,086 |
| Média | 0,089 | 0,054 | 0,131 | 0,070 | |
| Microporosidade, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| 0,00-0,05 | 0,395 | 0,378 | 0,252 | 0,311 | 0,334 |
| 0,05-0,10 | 0,349 | 0,365 | 0,30 | 0,307 | 0,333 |
| 0,10-0,20 | 0,335 | 0,345 | 0,337 | 0,312 | 0,332 |
| 0,20-0,40 | 0,339 | 0,357 | 0,314 | 0,313 | 0,331 |
| 0,40-0,60 | 0,340 | 0,344 | 0,312 | 0,331 | 0,332 |
| 0,60-1,00 | 0,346 | 0,349 | 0,337 | 0,340 | 0,343 |
| Média | 0,351 | 0,356 | 0,310 | 0,319 | |
| Porosidade total, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| 0,00-0,05 | 0,487 | 0,410 | 0,448 | 0,402 | 0,437 |
| 0,05-0,10 | 0,465 | 0,404 | 0,464 | 0,386 | 0,432 |
| 0,10-0,20 | 0,421 | 0,406 | 0,436 | 0,365 | 0,407 |
| 0,20-0,40 | 0,424 | 0,415 | 0,411 | 0,380 | 0,408 |
| 0,40-0,60 | 0,406 | 0,412 | 0,425 | 0,381 | 0,406 |
| 0,60-1,00 | 0,432 | 0,413 | 0,452 | 0,420 | 0,429 |
| Média | 0,439 | 0,410 | 0,441 | 0,389 | |
| Condutividade hidráulica, mm h ⁻¹ | | | | | |
| 0,00-0,05 | 12,81 | 0,00 | 109,47 | 13,05 | 33,83 |
| 0,05-0,10 | 4,39 | 0,27 | 59,14 | 4,05 | 15,13 |
| 0,10-0,20 | 0,14 | 0,14 | 17,89 | 0,55 | 4,68 |
| 0,20-0,40 | 4,47 | 0,00 | 18,95 | 6,15 | 6,89 |
| 0,40-0,60 | 4,66 | 0,23 | 7,59 | 3,04 | 3,72 |
| 0,60-1,00 | 0,00 | 0,00 | 1,93 | 3,29 | 1,30 |
| Média | 4,41 | 0,11 | 36,49 | 5,02 | |

Tal fato pode favorecer uma melhor estrutura do solo e maior infiltração de água, como constatado por Alves et al. (2005) que observaram taxa constante de infiltração de água no solo no valor de 116,50 cm h⁻¹, em uma área sob floresta, e 8,48 e 9,52 cm h⁻¹, respectivamente em área recém-preparada convencionalmente e preparada após nove meses.

Um solo com boa qualidade física deve apresentar duas características principais: a) deve ser estável, ou seja, as partículas de argila devem estar floculadas e não dispersas; b) o solo deve ter uma adequada distribuição de tamanho de poros e uma elevada porosidade total que fará com que o solo seja capaz de absorver, armazenar e liberar água para as plantas utilizarem em resposta à demanda de transpiração (Gate et al., 2006).

Considerando a equação proposta por Reichert et al. (2007), que relaciona a densidade do solo quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero e a argila, a densidade crítica para esse solo é de 1,45 Mg m⁻³, para um teor médio de argila de 482 g kg⁻¹.

Na pastagem a densidade da camada superficial (0,00 – 0,10 m) do solo foi superior a 1,45 Mg m⁻³ (Tabela 3) e diferiu das demais camadas (Tabela 6). A compactação em pastagem é menos problemática de ser reduzida do que nos demais sistemas pelo fato dela se concentrar na superfície (Silva et al., 2000b).

Tabela 4 - Valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados para os usos e camadas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada (m) | Usos | | | | |
|---------------|----------|----------|--------------|---------------|-------|
| | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | Média |
| 0,00-0,05 | 3,2 | 3,0 | 3,0 | 3,3 | 3,1 |
| 0,05-0,10 | 3,2 | 2,7 | 3,2 | 3,2 | 3,1 |
| 0,10-0,20 | 2,0 | 2,7 | 3,3 | 2,5 | 2,6 |
| 0,20-0,40 | 1,1 | 2,0 | 2,9 | 1,7 | 2,1 |
| 0,40-0,60 | 1,7 | 1,3 | 1,5 | 1,3 | 1,4 |
| 0,60-1,00 | 0,9 | 1,4 | 1,3 | 1,0 | 1,1 |
| Média | 2,2 | 2,2 | 2,5 | 2,1 | |

Tabela 5 - Contrastes ortogonais e significância para os usos e camadas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Contrastes | DS | Porosidade | | | K _{θs} | DMP |
|-------------------------------|----|------------|-------|-------|-----------------|-----|
| | | Macro | Micro | Total | | |
| 0,00 – 0,05 m | | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ** | ** | ns | ** | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ** | ** | ** | ** | ** | ns |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ** | ** | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | ** | ** | ** | ** | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ns | ** | ** | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ** | ** | ns |
| 0,05 – 0,10 m | | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | * | ** | ns | ** | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | * | ** | ns | ** | ns |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ** | ** | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | ** | ** | ** | ** | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | * | ns | ** | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | ** | ** | ns |
| 0,10 – 0,20 m | | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ** | ns | ns | ns | ** | ** |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | * | * | ** | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | * | * | ns | * | ** | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ** | ** | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ** | ** | ns |
| 0,20 – 0,40 m | | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | ns | * | ** |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ns | ** | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | * | ** | ns | ** | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ** | ** | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | * | ns | ns | ** | * | ** |
| 0,40 – 0,60 m | | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ** | * | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ns | ** | * | ns | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ns | ** | ns | * | ns | ns |
| 0,60 – 1,00 m | | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | ns | * | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ns | ** | ns | ** | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | ns | * | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ns | * | ns | * | ns | ns |

DS = densidade do solo; K_{θs} = condutividade hidráulica do solo saturado; DMP = diâmetro médio ponderado de agregados. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Tabela 6 - Contrastes ortogonais e significância para as camadas de solo na área de floresta e pastagem no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Contraste | DS | Porosidade | | | K _{θs} | DMP |
|------------------------|----|------------|-------|-------|-----------------|-----|
| | | Macro | Micro | Total | | |
| Floresta | | | | | | |
| 0,00-0,05 vs 0,05-0,10 | * | ns | ** | ns | ns | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,10-0,20 | ** | ns | ** | ** | * | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,20-0,40 | ** | ns | ** | ** | ns | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,40-0,60 | ** | ns | ** | ** | ns | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,60-1,00 | * | ns | ** | ** | * | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,10-0,20 | ns | ns | ns | * | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,20-0,40 | ns | ns | ns | * | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,40-0,60 | * | ** | ns | ** | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | * | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,20-0,40 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,10-0,20 vs 0,40-0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,10-0,20 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,20-0,40 vs 0,40-0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,20-0,40 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,40-0,60 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| Pastagem | | | | | | |
| 0,00-0,05 vs 0,05-0,10 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,10-0,20 | ** | ns | ** | ns | ns | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,20-0,40 | ** | ns | ** | ns | ns | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,40-0,60 | ** | * | ** | ns | ns | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,60-1,00 | ** | * | ** | ns | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,10-0,20 | * | ns | ** | ns | ns | ns |
| 0,05-0,10 vs 0,20-0,40 | ** | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,05-0,10 vs 0,40-0,60 | ** | ns | ** | ns | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,60-1,00 | ** | ns | * | ns | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,20-0,40 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,10-0,20 vs 0,40-0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,20-0,40 vs 0,40-0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | * |
| 0,20-0,40 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,40-0,60 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

DS = densidade do solo; K_{θs} = condutividade hidráulica do solo saturado; DMP = diâmetro médio ponderado de agregados. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

No eucalipto 20 a camada de 0,10 – 0,20 m apresentou densidade próxima a 1,45 Mg m⁻³ (Tabela 3), fato que pode estar associado à compactação causada pelo preparo do solo, denominada pé-de-arado, no momento de implantação da cultura, como constatado por outros autores em áreas agrícolas (Stone & Silveira, 1999; Alves & Suzuki, 2004). A camada superior a 0,10 m diferiu das camadas inferiores (Tabela 7), possivelmente associado ao

maior teor de matéria orgânica nessa camada (Tabela 2) e ao acúmulo de resíduos e decomposição de raízes.

O eucalipto 4,5 apresentou as maiores densidades em todas as camadas avaliadas (Tabela 3), e nas camadas superiores a 0,40 m a densidade foi maior que $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ e diferente dos demais usos (Tabela 5) e das camadas inferiores (Tabela 7).

Em uma revisão sobre compactação do solo, Reichert et al. (2007) constataram que em áreas agrícolas e pastagem a compactação ocorre até, no máximo, 0,20 m, enquanto em áreas florestais pode atingir maiores profundidades. Afirmam ainda que, em áreas florestais, com o revolvimento do solo para plantio do novo povoamento a compactação é eliminada até a camada de ação dos implementos, porém, em áreas sob condução de rebrota, a compactação permanece. Os resultados obtidos neste estudo para o eucalipto 4,5 estão de acordo com Reichert et al. (2007). Como o solo foi revolvido apenas na linha de plantio da segunda rotação do eucalipto a compactação causada pela colheita do 1º plantio permaneceu nas entrelinhas.

A diferença de densidade entre as áreas está associada não apenas ao uso dado ao solo, mas também às diferenças de textura (Tabela 1) entre as áreas e profundidades (Tabela 8), embora esse fator possa estar contribuindo em menor intensidade (devido ao baixo coeficiente de determinação = r^2). Essa relação entre a densidade e argila corrobora com Reichert et al. (2003) e Reinert et al. (2006). Com decréscimo do teor de argila ($Ds = 1,5759 - 0,0004 \text{ Argila}$; $r^2 = 0,07^{**}$), e conseqüente aumento da areia total ($Ds = 1,1832 + 0,0005 \text{ Areia total}$; $r^2 = 0,07^{**}$), houve incremento da densidade do solo (Tabela 8).

O eucalipto 20 apresentou maior macroporosidade em todas as camadas avaliadas, seguido pela floresta (Tabela 3). Devido à menor ação antrópica nessas áreas, o desenvolvimento e decomposição de raízes em maiores profundidades, o aporte de matéria orgânica e ação de organismos, a formação de macroporos pode ser favorecida.

O solo é um corpo natural constituído por sólidos, líquidos e gases, que se originam das rochas e materiais orgânicos. O solo possui mecanismos que o permitem reter nutrientes e água, sendo a capacidade de troca catiônica (CTC) a principal propriedade que lhe permite atuar como reservatório de nutrientes, retendo-os contra a lixiviação pela água da chuva, e a propriedade que lhe permite armazenar água, mesmo contra a força da gravidade, é a porosidade (Azevedo & Dalmolin, 2004). A ação antrópica no solo pode alterar essas relações entre sólidos, líquidos e gases no solo e conseqüentemente sua qualidade.

Tabela 7 - Contrastes ortogonais e significância para as camadas de solo na área de eucalipto 20 e eucalipto 4,5 no Argissolo Vermelho distrófico latossólico, município de Butiá/RS.

| Contraste | DS | Porosidade | | | K _{θs} | DMP |
|------------------------|----|------------|-------|-------|-----------------|-----|
| | | Macro | Micro | Total | | |
| Eucalipto 20 | | | | | | |
| 0,00-0,05 vs 0,05-0,10 | ** | ns | ** | ns | * | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,10-0,20 | ** | ** | ** | ns | ** | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,20-0,40 | ** | ** | ** | * | ** | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,40-0,60 | ** | ** | ** | ns | ** | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,60-1,00 | ** | ** | ** | ns | ** | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,10-0,20 | ** | ** | ns | * | * | ns |
| 0,05-0,10 vs 0,20-0,40 | * | ** | ns | ** | ns | ns |
| 0,05-0,10 vs 0,40-0,60 | * | * | ns | ** | * | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,60-1,00 | ns | * | ns | ns | ** | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,20-0,40 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,10-0,20 vs 0,40-0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,60-1,00 | * | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,20-0,40 vs 0,40-0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,20-0,40 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ** | ns | ** |
| 0,40-0,60 vs 0,60-1,00 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Eucalipto 4,5 | | | | | | |
| 0,00-0,05 vs 0,05-0,10 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,00-0,05 vs 0,10-0,20 | ns | ** | ns | ** | * | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,20-0,40 | ns | * | ns | * | ns | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,40-0,60 | ns | ** | ** | ns | * | ** |
| 0,00-0,05 vs 0,60-1,00 | ** | ns | ** | ns | * | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,10-0,20 | ns | * | ns | ns | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,20-0,40 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,40-0,60 | * | * | ** | ns | ns | ** |
| 0,05-0,10 vs 0,60-1,00 | ** | ns | ** | ** | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,20-0,40 | ns | ns | ns | ns | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,40-0,60 | * | ns | * | ns | ns | ** |
| 0,10-0,20 vs 0,60-1,00 | ** | * | ** | ** | ns | ** |
| 0,20-0,40 vs 0,40-0,60 | ns | ns | * | ns | ns | * |
| 0,20-0,40 vs 0,60-1,00 | ** | ns | ** | ** | ns | ** |
| 0,40-0,60 vs 0,60-1,00 | ns | * | ns | ** | ns | ns |

DS = densidade do solo; K_{θs} = condutividade hidráulica do solo saturado; DMP = diâmetro médio ponderado de agregados. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

A pastagem apresentou menor macroporosidade na camada compactada (0,00 – 0,10 m), com valores inferiores a 0,10 m³ m⁻³, considerado mínimo para o adequado crescimento e desenvolvimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Baver, 1949; Gupta & Allmaras, 1987) (Tabela 3). Embora a compactação causada pelo pisoteio animal seja superficial (0,00 - 0,10 m), a taxa de infiltração de água e a lâmina de infiltração

de água acumulada também são afetadas (Lanzanova, 2005). Em um sistema de integração lavoura-pecuária, o pisoteio animal alterou a densidade, macroporosidade e porosidade total, principalmente na camada superficial do solo (0,00 - 0,05 m), com redução da macroporosidade também na camada de 0,05-0,10 m em um Argissolo Vermelho-Amarelo aluminoso típico (249 g kg⁻¹ de areia, 407 g kg⁻¹ de silte e 344 g kg⁻¹ de argila) (Lanzanova, 2005).

Tabela 8 – Equações relacionando algumas propriedades físicas do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Equações |
|--|
| DS = 1,5759 - 0,0004 Argila (r ² = 0,07 ^{**}) |
| Macro = 0,1038 - 0,00004 Argila (r ² = 0,00 ^{ns}) |
| Micro = 0,2999 + 0,00007 Argila (r ² = 0,03 [*]) |
| PT = 0,4037 + 0,00003 Argila (r ² = 0,00 ^{ns}) |
| Log K _{θS} = 1,5952 + 0,0004 Argila (r ² = 0,00 ^{ns}) |
| DS = 1,1832 + 0,0005 Areia total (r ² = 0,07 ^{**}) |
| Macro = 0,0466 + 0,0001 Areia total (r ² = 0,02 ^{ns}) |
| Micro = 0,3891 - 0,0001 Areia total (r ² = 0,08 ^{**}) |
| PT = 0,4357 - 0,00004 Areia total (r ² = 0,00 ^{ns}) |
| Log K _{θS} = 1,2923 + 0,0013 Areia total (r ² = 0,00 ^{ns}) |
| Macro = 0,3923 - 0,2224 DS (r ² = 0,39 ^{**}) |
| Micro = 0,3036 - 0,0221 DS (r ² = 0,01 ^{ns}) |
| PT = 0,6960 - 0,2003 DS (r ² = 0,46 ^{**}) |
| Log K _{θS} = 9,1355 - 5,3391 DS (r ² = 0,19 ^{**}) |
| Log K _{θS} = -1,0853 + 27,4057 Macro (r ² = 0,43 ^{**}) |
| Log K _{θS} = 8,3978 - 20,3833 Micro (r ² = 0,17 ^{**}) |
| Log K _{θS} = -5,1130 + 16,0347 PT (r ² = 0,12 ^{**}) |

Ds = densidade do solo, Mg m⁻³; Macro = macroporosidade, m³ m⁻³; Micro = microporosidade, m³ m⁻³; PT = porosidade total, m³ m⁻³; K_{θS} = condutividade hidráulica do solo saturado, mm h⁻¹. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Embora a camada compactada no eucalipto 4,5 ocorresse até a camada de 0,40 m, sua macroporosidade na camada de 0,00 - 0,10 m esteve próxima a 0,10 m³ m⁻³, fato que pode

estar associado à concentração de raízes e aporte de matéria orgânica nessa camada. Mesmo sob elevada densidade, esses macroporos podem contribuir para a condutividade hidráulica (Tabela 3). Provavelmente o denso sistema radicular do eucalipto e o elevado aporte de matéria orgânica não foram capazes de reduzir a densidade do solo, contudo aumentou sua porosidade.

Embora a textura do solo também possa influenciar no tamanho de poros, nesse estudo esse fator parece não ter apresentado efeito significativo, sendo a macroporosidade (Macro = $0,3923 - 0,2224$ DS; $r^2 = 0,39^{**}$) e a porosidade total (PT = $0,6960 - 0,2003$ DS; $r^2 = 0,46^{**}$) afetadas pelo uso do solo, sem efeito na microporosidade (Micro = $0,3036 - 0,0221$ DS; $r^2 = 0,01^{ns}$). Albuquerque et al. (2001) constataram que os macroporos foram mais sujeitos a mudanças impostas pelo manejo (mata, preparo convencional e plantio direto, em área agrícola) do que os microporos. De acordo com Reichert et al. (2007), a densidade e a porosidade do solo são parâmetros relacionados com alterações no volume de solo; portanto, altamente relacionados com a compactação do solo. Segundo os autores, a densidade apresenta relação inversa com a porosidade. A relação da porosidade com argila e areia total ocorre devido ao arranjo das partículas do solo. A fração argila do solo possui forma laminar e, com aumento do seu teor, as partículas se encaixam reduzindo a macroporosidade (Macro = $0,1038 - 0,00004$ Argila; $r^2 = 0,00^{ns}$) e aumentando a microporosidade (Micro = $0,2999 + 0,00007$ Argila; $r^2 = 0,03^*$), formando uma massa argilosa homogênea. Por outro lado, a areia possui um formato irregular, dificultando o encaixe entre as partículas e, nos espaços onde não ocorre contato entre as partículas de areia, formam-se os macroporos (Macro = $0,0466 + 0,0001$ Areia total; $r^2 = 0,02^{ns}$), nesse caso, denominado de porosidade textural, relacionada à textura do solo.

O eucalipto 20 apresentou maior condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 3), diferindo dos demais tratamentos (Tabela 5). Na camada superficial (0,00 – 0,05 m) da floresta e das áreas sob eucalipto a condutividade foi superior (Tabela 3) e, de modo geral, diferente significativamente em relação às demais camadas (Tabelas 6 e 7).

A condutividade hidráulica foi influenciada pela densidade (Log $K_{\theta S} = 9,1355 - 5,3391$ DS; $r^2 = 0,19^{**}$) e pelo sistema poroso (Log $K_{\theta S} = -5,1130 + 16,0347$ PT; $r^2 = 0,12^{**}$), principalmente a macroporosidade (Log $K_{\theta S} = -1,0853 + 27,4057$ Macro; $r^2 = 0,43^{**}$) (Tabela 8). Reichert et al. (2007) dizem que em área agrícola, pecuária ou florestal, o processo com que a compactação afeta as propriedades hidráulicas do solo é o mesmo, podendo diferir apenas na intensidade com que essas alterações ocorrem. Rab (2004) verificou em área florestal decréscimo exponencial da densidade com aumento da macroporosidade. Mesquita

& Moraes (2004) afirmam que o fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos, esperando-se correlação entre a condutividade hidráulica do solo saturado e a macroporosidade. Com a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (Boone & Veen, 1994). Beutler et al. (2003) também observaram que o aumento da compactação reduziu a condutividade hidráulica do solo saturado, avaliada no campo com o permeâmetro de Guelph, nas profundidades de 0,08 e 0,15 m, e com alto coeficiente de correlação negativo para a densidade do solo e positivo para a porosidade total e macroporosidade em um Latossolo Vermelho distrófico (271 g kg⁻¹ argila), enquanto a microporosidade apresentou correlação negativa e não significativa com a condutividade hidráulica, demonstrando ser um parâmetro pouco sensível às variações na compactação do solo. Silva (2003) e Lima et al. (2006) também observaram relação entre compactação e macroporosidade e condutividade hidráulica. Geralmente, a redução da porosidade ocorre com os poros maiores (macroporos), responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo e que são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação (Greacen & Sands, 1980; Reichert et al., 2007). A condutividade hidráulica do solo saturado, avaliada em laboratório, foi 38 vezes menor em um sistema integração lavoura-pecuária sob plantio direto do que em uma área de mata, atribuído à diminuição dos macroporos em um Nitossolo (550 g kg⁻¹ de argila) (Albuquerque et al., 2001). Com a compactação há aumento da umidade volumétrica e da capacidade de campo, enquanto a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Como consequência, ocorre aumento do escoamento superficial de água e devido à diminuição da disponibilidade de água, restrição às raízes e aeração deficiente o crescimento das plantas pode ser reduzido (Greacen & Sands, 1980).

Reichert et al. (2007) propõem duas formas para obtenção de um valor crítico de condutividade hidráulica do solo saturado. Em uma delas, a partir de uma macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³, valor considerado crítico para o crescimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Baver, 1949; Gupta & Allmaras, 1987), e a outra considerando um grau de compactação de 85%. Os autores obtiveram uma condutividade de 13,8 mm h⁻¹ a partir da macroporosidade e de 27,5 mm h⁻¹ pelo grau de compactação.

Pela equação $\text{Log } K_{\theta S} = -1,0853 + 27,4057 \text{ Macro}$ (Tabela 8), obtém-se uma condutividade de 0,22 mm h⁻¹ para uma macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³, valor inferior ao obtido por Reichert et al. (2007). O eucalipto 20 e eucalipto 4,5 apresentaram valores superiores a 0,22 mm h⁻¹ em todas as camadas avaliadas, enquanto a floresta e pastagem apresentaram algumas camadas com valores inferiores a esse (Tabela 3). Embora o eucalipto

4,5 tenha apresentado maior densidade e menor macroporosidade que os demais usos, sua condutividade foi superior a $0,22 \text{ mm h}^{-1}$. Mesquita & Moraes (2004) dizem que a presença de um “megaporo” em uma amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas muito sua condutividade.

Realizou-se uma análise de correlação entre os parâmetros físicos e a matéria orgânica do solo com o diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados (Tabela 9), pois, de acordo com Reichert et al. (2007), para evitar conclusões ou interpretações errôneas é importante que se avalie não apenas um parâmetro físico do solo, como a estabilidade de agregados, mas um conjunto de parâmetros que possam auxiliar no diagnóstico do solo. Um exemplo disso foi o trabalho de Carpenedo & Mielniczuk (1990) que verificaram, no plantio direto em área agrícola, aumento do DMP dos agregados estáveis em água na camada de 0,00 - 0,10 m, porém a avaliação da estrutura interna dos agregados mostrou que eles foram formados por forças de compressão e não por ação biológica das raízes e microrganismos

Tabela 9 – Coeficientes de correlação de Pearson entre o diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados e algumas propriedades físicas e matéria orgânica do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Variável | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 |
|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Macroporosidade | 0,46 ** | -0,33 ^{ns} | 0,04 ^{ns} | 0,16 ^{ns} |
| Microporosidade | 0,35 * | 0,57 ** | -0,04 ^{ns} | -0,57 ** |
| Porosidade total | 0,63 ** | 0,03 ^{ns} | 0,01 ^{ns} | -0,24 ^{ns} |
| Densidade | -0,47 ** | 0,35 * | -0,04 ^{ns} | 0,65 ** |
| Condutividade | 0,31 ^{ns} | -0,05 ^{ns} | 0,32 ^{ns} | 0,31 ^{ns} |
| Cascalho | -0,62 ** | -0,55 ** | 0,01 ^{ns} | -0,64 ** |
| Areia total | 0,78 ** | 0,50 ** | 0,56 ** | 0,89 ** |
| Areia grossa | 0,67 ** | 0,26 ^{ns} | 0,39 * | 0,89 ** |
| Areia fina | 0,77 ** | 0,67 ** | 0,62 ** | 0,84 ** |
| Silte | 0,79 ** | 0,76 ** | 0,65 ** | 0,83 ** |
| Argila | -0,81 ** | -0,67 ** | -0,64 ** | -0,89 ** |
| Matéria orgânica | 0,79 ** | 0,69 ** | 0,56 ** | 0,70 ** |

De acordo com Kemper & Chepil (1965), a distribuição do tamanho de agregados do solo é importante por que o tamanho dos agregados determina sua suscetibilidade ao movimento (erosão) pelo vento e água, e também determina as dimensões do espaço poroso em solos cultivados.

Qualquer determinação da distribuição do tamanho de agregados é também, de certo modo, a determinação da estabilidade de agregados (Kemper, 1965). Isso por que alguma força é necessária para desintegrar a massa de solo em agregados, e os agregados que continuam intactos são aqueles em que as partículas primárias possuem uma força de coesão suficiente para serem estáveis à aplicação de força.

A redução do DMP em profundidade pode estar associada à redução da matéria orgânica e ao menor efeito da compressão do solo pelo pisoteio animal (pastagem) e tráfego de máquinas (eucalipto 4,5) nas camadas inferiores do solo.

A textura e a matéria orgânica do solo apresentaram maior correlação com o DMP do que os parâmetros relacionados à estrutura do solo, como porosidade e densidade (Tabela 9). Vários trabalhos têm apresentado relação da matéria orgânica com estabilidade de agregados (Alderfer & Merkle, 1941; Tisdall & Oades, 1982).

Enquanto a floculação e a dispersão de agregados parece ser um fenômeno eletrostático, a estabilização de grandes agregados envolve cimentação ou agentes ligantes, que podem ser inorgânicos (agentes ligantes que podem ser considerados como cimentantes permanentes e, se forem predominantes, a presença de materiais orgânicos como cimentantes podem ter pequeno benefício extra), associações organo-minerais (funcionam como agentes ligantes em agregados, particularmente aqueles de diâmetro menor que 250 μm) ou orgânicos (Tisdall & Oades, 1982). Botelho (2005) verificou a presença de hematita e goethita em um Argissolo coletado na região do Escudo Cristalino do Rio Grande do Sul, com material de origem granito. É possível que ocorra a presença desses óxidos no solo em estudo, e esses argilominerais estejam contribuindo para a agregação do solo, tanto pelas associações organo-minerais quanto apenas ligações minerais.

Na floresta o DMP não diferiu na camada superior a 0,10 m, que diferiu das camadas inferiores (Tabela 6). Essa maior agregação na camada superficial está associada à melhor estrutura do solo (porosidade e densidade) e principalmente à textura e matéria orgânica (Tabela 9). Tisdall & Oades (1982) citam que parte da estabilidade de agregados em solos virgens está relacionada à fatores físicos como a reorganização das partículas.

Na pastagem, além da textura e matéria orgânica (Tabela 9), a compressão do solo pelo pisoteio animal contribuiu para aumentar o DMP na camada superior a 0,10 m (Tabela 4).

Lanzanova (2005) observou que o efeito do denso sistema radicular das gramíneas foi mais pronunciado do que do pisoteio bovino contínuo nos valores de DMG em uma área de campo nativo em um Argissolo Vermelho-Amarelo alumínico típico (249 g kg^{-1} de areia, 407 g kg^{-1} de silte e 344 g kg^{-1} de argila).

No eucalipto 20 as camadas superiores a 0,40 m apresentaram DMP semelhante e diferente das camadas inferiores (Tabela 7), além de valores superiores aos demais usos nas camadas superiores a 0,40 m (Tabela 4). A maior agregação do solo esteve associada à textura e matéria orgânica, sem relação com a estrutura do solo (Tabela 4), pois como verificado pelos dados de densidade e porosidade (Tabela 3), esse uso apresenta uma estrutura muito solta, com um baixo nível de compactação.

No eucalipto 4,5 o DMP na camada de 0,00 – 0,10 m foi semelhante e superior às demais camadas (Tabela 4). Essa semelhança esteve associada à textura e matéria orgânica (Tabela 9), além do efeito compressivo causado pela colheita do eucalipto da 1ª rotação, que influenciou na agregação do solo até a camada de 0,40 m. As camadas inferiores a 0,40 m apresentaram DMP semelhantes, sendo influenciados apenas pela textura do solo. O efeito compressivo do tráfego de máquinas tem relevante importância no diâmetro médio dos agregados (Silva, 2003). Roth et al. (1991) observaram que a compactação dos agregados na camada de 0,00 - 0,10 m, no preparo convencional e plantio direto em área agrícola, reduziu principalmente os macroporos, enquanto os meso e microporos dos agregados foram semelhantes ao da mata natural. Quando os agregados são formados por aproximação de partículas provocada pela ação compressiva de máquinas e implementos agrícolas, sem a ocorrência do processo de estabilização, as ligações existentes entre as partículas são mais facilmente desfeitas (Silva & Mielniczuk, 1997).

A intensidade e a profundidade de compactação variaram com os diferentes usos. Reichert et al. (2007) dizem que a profundidade de compactação é variável em função das especificações da máquina e seu rodado, condições do solo, número de vezes em que o solo é trafegado e do seu histórico de pressões, além do manejo (se pastagem, floresta ou agrícola). Novak et al. (1992) verificaram aumento da densidade próximo a 0,60 m de profundidade com 15 passadas de um trator (pressão de contato do pneu: 91 kPa no pneu dianteiro e 100 kPa no pneu traseiro) em um Latossolo Vermelho-Escuro álico de textura argilosa revolvido com umidade de 33% (próximo à umidade na capacidade de campo). Radford et al. (2000) observaram um aumento significativo na densidade do solo a uma profundidade de 0,11 m quando uma máquina com 10 Mg e 2 Mg, respectivamente no eixo dianteiro e traseiro, trafegou uma vez em um Vertissolo. A resistência do solo à penetração logo após a aplicação

da compactação por uma máquina carregadeira de 10 Mg, apresentou aumento significativo até a profundidade de 0,12 m em um Latossolo Vermelho distroférico típico (Suzuki, 2005), enquanto que em um solo franco-arenoso houve aumento da resistência até 0,28 m em tratamentos com tráfego e sem tráfego (Streck et al., 2004). O grande número de passadas de um trator florestal autocarregável (Forwarder) (peso da máquina de 100000 N; peso médio da carga de 10460 N e pressão de contato carregado por rodado de 0,152 MPa) ao longo da trilha para retirar todo volume de madeira preestabelecido, aumentou a densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa, com reflorestamento de *Eucalyptus grandis* de 7 anos, na camada de 0,00 - 0,15 m (Fernandes & Souza, 2003). Na camada superficial do solo (0,00 - 0,15 m), uma ou duas passadas de um tracked-skidder (trator arrastador com esteiras metálicas e massa de 21,5 kN) sem carga não produziu efeito significativo em relação à área não trafegada; para a camada de 0,30 - 0,50 m, duas passadas pelo clambunk (trator arrastador com esteiras metálicas nos rodados dos pneus e massa de 20,8 kN) e tracked-skidder carregados aumentaram a densidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa (Lopes et al., 2006). O guincho arrastador, o Harvester e o Forwarder utilizados na colheita florestal provocaram compactação até a camada de 0,30 - 0,50 m, tendo o guincho provocado o maior incremento da densidade de um Latossolo Vermelho-Escuro de textura argilosa após seu tráfego (Fernandes & Vitória, 1998).

No eucalipto 4,5 havia 12 t ha⁻¹ de serrapilheira no momento das coletas de solo. Embora a presença de palha na superfície do solo possa dissipar a energia da compactação pelo tráfego de máquinas (Brandt, 2005; Braida et al., 2006), em áreas florestais é possível que a profundidade de compactação seja maior do que em áreas agrícolas ou de pecuária. Isso ocorre porque o peso de máquinas é maior, o tráfego durante a colheita é mais intenso e há possibilidade de uma maior umidade do solo devido ao sombreamento causado pela espécie florestal e maior acúmulo de resíduos vegetais e matéria orgânica no solo (Reichert et al., 2007).

É difícil recomendar um manejo sustentável dos solos, pois há uma grande diversidade de solos associados às condições climáticas e tipos de plantas cultivadas, sendo o número de combinações dessas variáveis muito grande (Costa et al., 2003). Além disso, a intensidade de uso do solo tem aumentado e, conseqüentemente, as possibilidades de degradação da qualidade do solo aumentam.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água e do parâmetro S. De modo geral, houve aumento dos valores dos parâmetros com aumento da profundidade.

Nas maiores tensões e com aumento da profundidade a amplitude de variação entre as curvas de retenção de água diminuem (Figura 7).

Na camada de 0,025 – 0,05 m as curvas da floresta e pastagem (Figura 7a) são semelhantes (Tabela 11) e apresentam maior disponibilidade de água (Tabela 12), e nas tensões de 500 a 1500 kPa as curvas da pastagem e eucalipto 4,5 não apresentam diferença (Tabela 11). As áreas sob eucalipto apresentaram menor disponibilidade de água (Tabela 12). No eucalipto 20 pode estar relacionado à menor estruturação, ou baixo nível de compactação desse solo, contribuindo para uma maior infiltração e menor retenção de água, enquanto no eucalipto 4,5 essa menor disponibilidade de água pode estar associada aos níveis elevados de compactação do solo, acarretando menor infiltração e maior escoamento superficial e erosão. Collares (2005) verificou que níveis de compactação afetaram a retenção de água no solo. Abreu et al. (2004) dizem que nem sempre o limitante da produtividade das culturas é a resistência à penetração do solo, mas um conjunto de fatores, tais como: a própria resistência do solo à penetração de raízes, o espaço aéreo destinado às trocas gasosas e a quantidade de água disponível para as plantas (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Silva, 2003).

Na camada de 0,10 – 0,125 m as curvas da floresta e pastagem (Figura 7b) foram novamente semelhantes (Tabela 11) e apresentaram maior disponibilidade de água (Tabela 12), e as curvas das áreas sob eucalipto também foram semelhantes entre si (Figura 7b) e tiveram menor disponibilidade de água (Tabela 12). Se a pressão aplicada à superfície do solo for superior à sua capacidade de suporte, ela é transmitida tridimensionalmente, causando elevada compactação e rearranjando as partículas do solo em arranjos mais densos que alteram a pressão de água nos poros. Quando a rede de poros do solo não é rígida, modificações localizadas no potencial de água no solo criam gradientes localizados que alteram a distribuição de água no perfil. Durante essa redistribuição os poros de aeração (poros maiores) são comprimidos em poros menores que se tornam preenchidos com solução do solo (Horn et al., 2004).

Semelhanças entre as curvas da floresta e eucalipto 4,5, e do eucalipto 20 e eucalipto 4,5 (Tabela 11) foram observadas na camada de 0,20 – 0,225 m (Figura 7c). Nessa camada a amplitude de variação das curvas diminui (Figura 7c), bem como a disponibilidade de água e sua diferença entre os usos (Tabela 12).

A compactação afeta as propriedades físicas e químicas do solo, principalmente o armazenamento e disponibilidade de água e nutrientes (Hamza & Anderson, 2005). Os efeitos da compactação na densidade do solo e resistência à penetração, e decréscimo da porosidade,

infiltração e capacidade de armazenamento de água reduzem a eficiência da fertilização e produtividade das culturas e aumentam o escoamento superficial e erosão do solo, acarretando problemas ambientais. Pérez Gomar (2005) verificou que a compactação pelo pisoteio bovino (20 e 40 animais ha⁻¹) em um Vertissolo aumentou a densidade e reduziu a porosidade total, refletindo em maiores conteúdos de água nas tensões de 33 e 100 kPa, mostrando o efeito benéfico da compactação. No caso do eucalipto 20, talvez uma pequena compactação, elevando-a de um nível baixo para intermediário, favoreceria o armazenamento de água, no entanto, uma compactação excessiva, como é o caso do eucalipto 4,5, comprometeria tanto a estrutura do solo quanto seu armazenamento de água.

Tabela 10 – Valores médios dos parâmetros de ajuste da curva de retenção de água e parâmetro S para cada tratamento e camada do Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Parâmetros | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 |
|-----------------------|----------|----------|--------------|---------------|
| Camada 0,025 – 0,05 m | | | | |
| α | 0,1111 | 0,1740 | 0,1507 | 0,3785 |
| m | 0,3563 | 0,2869 | 0,3558 | 0,2702 |
| n | 1,5777 | 1,4030 | 1,6359 | 1,3710 |
| θ_r | 0,1898 | 0,1827 | 0,1340 | 0,1693 |
| θ_s | 0,4070 | 0,4098 | 0,2655 | 0,3680 |
| Camada 0,10 – 0,125 m | | | | |
| α | 0,3150 | 0,2196 | 0,6508 | 0,4930 |
| m | 0,2720 | 0,2934 | 0,2769 | 0,2500 |
| n | 1,3737 | 1,4161 | 1,3858 | 1,3336 |
| θ_r | 0,1720 | 0,1943 | 0,1700 | 0,1597 |
| θ_s | 0,4282 | 0,4185 | 0,3506 | 0,3628 |
| Camada 0,20 – 0,225 m | | | | |
| α | 0,4076 | 0,6031 | 0,9482 | 0,4975 |
| m | 0,2793 | 0,3065 | 0,2658 | 0,2664 |
| n | 1,3888 | 1,4429 | 1,3641 | 1,3635 |
| θ_r | 0,1877 | 0,2395 | 0,1863 | 0,1853 |
| θ_s | 0,4145 | 0,4128 | 0,3967 | 0,3820 |

θ_r = umidade volumétrica residual; θ_s = umidade volumétrica de saturação.

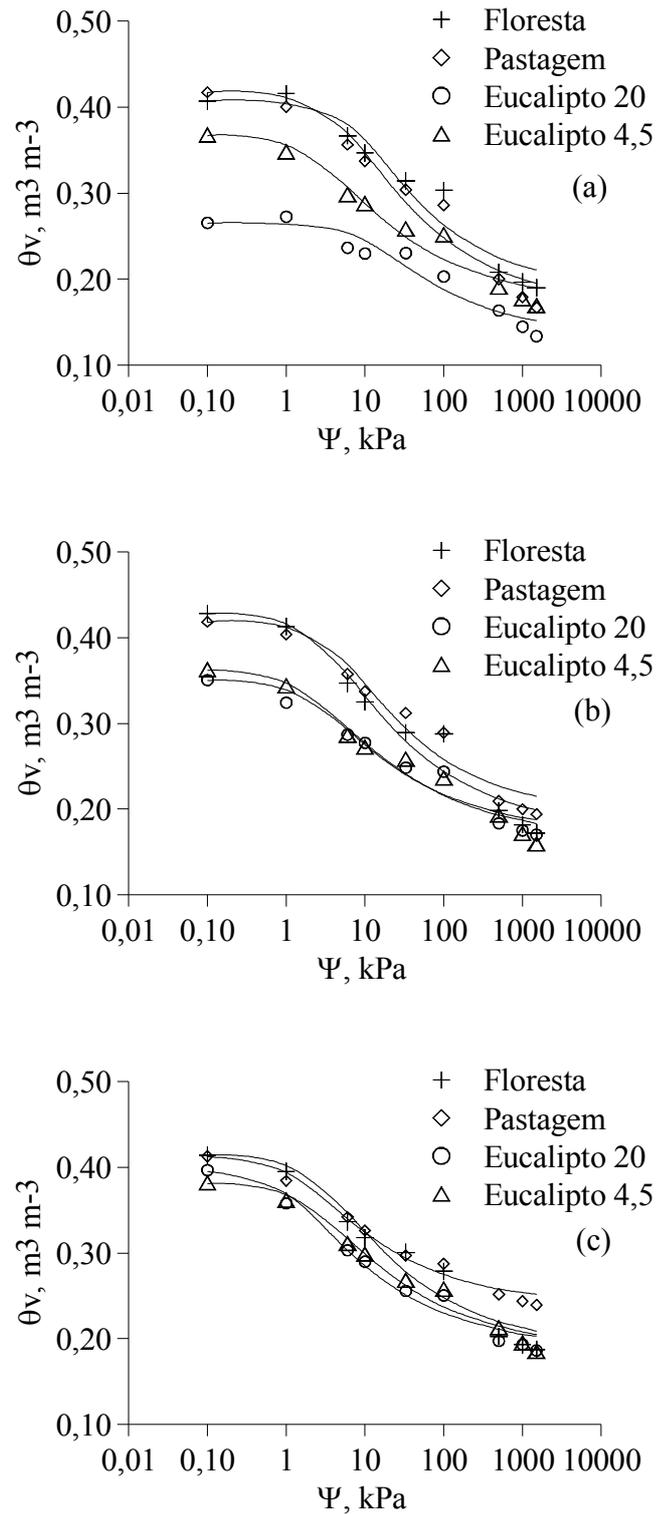


Figura 7 – Valores observados (representados pelos símbolos) e estimados (representados pela linha cheia) da curva característica de retenção de água nas camadas de 0,025 a 0,05 m (a), 0,10 a 0,125 m (b) e 0,20 a 0,225 m (c) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

Tabela 11 - Contrastes ortogonais e significância para as umidades volumétricas estimadas nas tensões da curva característica de retenção de água no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tensão kPa | Floresta vs Pastagem | Floresta vs Eucalipto 20 | Floresta vs Eucalipto 4,5 | Pastagem vs Eucalipto 20 | Pastagem vs Eucalipto 4,5 | Eucalipto20 vs Eucalipto 4,5 |
|----------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 0,025 – 0,05 m | | | | | | |
| saturado | ns | ** | * | ** | ** | ** |
| 1 | ns | ** | ** | ** | ** | ** |
| 6 | ns | ** | ** | ** | ** | ** |
| 10 | ns | ** | ** | ** | ** | ** |
| 33 | ns | ** | ** | ** | ** | * |
| 100 | ns | ** | ** | ** | * | * |
| 500 | ns | ** | ** | ** | ns | ** |
| 1000 | ns | ** | ** | ** | ns | ** |
| 1500 | ns | ** | * | ** | ns | ** |
| 0,10 – 0,125 m | | | | | | |
| saturado | ns | ** | ** | ** | * | ns |
| 1 | ns | ** | ** | ** | ** | ns |
| 6 | ns | ** | ** | ** | ** | ns |
| 10 | ns | * | * | ** | ** | ns |
| 33 | ns | * | * | ** | ** | ns |
| 100 | ns | * | * | ** | ** | ns |
| 500 | ns | ns | ns | ** | ** | ns |
| 1000 | ns | ns | ns | ** | ** | ns |
| 1500 | ns | ns | ns | ** | ** | ns |
| 0,20 – 0,225 m | | | | | | |
| saturado | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 1 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 6 | ns | * | ns | * | ns | ns |
| 10 | ns | * | ns | * | ns | ns |
| 33 | ns | * | ns | ** | * | ns |
| 100 | * | ns | ns | ** | ** | ns |
| 500 | ** | ns | ns | ** | ** | ns |
| 1000 | ** | ns | ns | ** | ** | ns |
| 1500 | ** | ns | ns | ** | ** | ns |

ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Tabela 12 – Água disponível estimada ($m^3 m^{-3}$) para os diferentes usos no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 |
|--------------|----------|----------|--------------|---------------|
| 0,025 – 0,05 | 0,151 | 0,152 | 0,093 | 0,098 |
| 0,10 – 0,125 | 0,133 | 0,131 | 0,087 | 0,094 |
| 0,20 – 0,225 | 0,116 | 0,072 | 0,082 | 0,094 |

A curva característica de água no solo ou curva de retenção é a relação entre potencial matricial (ψ_m) e umidade do solo (θ). Para altos teores de água a curva característica depende do arranjo e das dimensões dos poros, passando a ser uma função da densidade e porosidade do solo. Para baixos teores de água, o potencial matricial praticamente independe desses fatores, dependendo mais da textura e mineralogia do solo (Hillel, 1998; Reichardt & Timm, 2004). Há relatos na literatura demonstrando que nas maiores tensões (500, 1000 e 1500 kPa) o efeito do manejo ou da estrutura do solo seja praticamente nulo, e o efeito da textura do solo seja mais significativo. Nesse estudo verificou-se que a amplitude de variação das curvas diminuem com aumento das tensões, embora ainda tenha ocorrido diferenças entre os usos nas maiores tensões, podendo esse efeito estar associado às pequenas diferenças na textura entre as áreas.

O parâmetro S tem sido utilizado como indicativo da qualidade do solo (Dexter, 2004a, 2004b, 2004c). Em todas as camadas avaliadas a floresta apresentou maior parâmetro S, seguida da pastagem (Tabela 13), e diferiram dos demais usos (Tabela 14). Nenhum contraste significativo foi verificado na camada de 0,20 – 0,225 (Tabela 14), podendo estar relacionado à menor amplitude de variação das curvas de retenção de água dos diferentes usos (Figura 7).

Dexter (2004a) sugere que valores de S superiores a 0,035 representam solos com boa qualidade física, enquanto que valores entre 0,020 e 0,035 são solos de qualidade física ruim e valores menores que 0,020 são solos de qualidade física muito ruim. Considerando as faixas sugeridas por Dexter (2004a) todos os usos teriam boa qualidade física. No entanto, esse fato não foi observado pelas outras avaliações físicas (densidade, porosidade e DMP) e pelas curvas de retenção de água. As faixas sugeridas por Dexter (2004a) podem não ser adequadas para essas condições. O maior parâmetro S foi relacionado ao maior armazenamento de água no solo (Figura 7) e ao nível intermediário de compactação obtido nos usos floresta e pastagem.

Tabela 13 - Valores médios do parâmetro S para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | Média |
|--------------|----------|----------|--------------|---------------|-------|
| 0,025 – 0,05 | 0,055 | 0,046 | 0,035 | 0,038 | 0,044 |
| 0,10 – 0,125 | 0,049 | 0,047 | 0,036 | 0,036 | 0,042 |
| 0,20 – 0,225 | 0,045 | 0,038 | 0,040 | 0,037 | 0,040 |
| Média | 0,050 | 0,043 | 0,037 | 0,037 | |

Tabela 14 - Contrastes ortogonais e significância para o parâmetro S no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada m | Floresta vs Pastagem | Floresta vs Eucalipto 20 | Floresta vs Eucalipto 4,5 | Pastagem vs Eucalipto 20 | Pastagem vs Eucalipto 4,5 | Eucalipto20 vs Eucalipto 4,5 |
|------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 0,025–0,05 | ns | * | * | ns | ns | ns |
| 0,10-0,125 | ns | ** | ** | * | * | ns |
| 0,20-0,225 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Em termos de estrutura do solo o eucalipto parece apresentar grande potencial para reflorestamento e recuperação de áreas, como constatado no eucalipto 20 que apresentou características físicas do solo semelhantes à floresta. Inclusive, sua condutividade hidráulica foi superior à floresta e as demais áreas. No entanto, como cultura comercial a melhor estrutura do solo seria afetada negativamente pela colheita, como verificado no eucalipto 4,5. Cavenage et al. (1999) verificaram que o pinus e a mata ciliar foram promissores na recuperação da macroporosidade de um Latossolo Vermelho-Escuro.

O aumento da densidade na camada superficial do solo nas áreas de pastagem parece ser um problema menos complexo em relação às áreas de eucalipto, onde o aumento da densidade pode alcançar maiores profundidades, como nesse estudo, que chegou a aproximadamente 0,40 m.

Mesmo o corte do eucalipto ter sido realizado com motosserra, o maior impacto na estrutura do solo parece estar relacionada com a operação de retirada da madeira da área, ocorrendo tráfego intenso do Forwarder.

O Track Skider trafegando duas vezes carregado na mesma linha de tráfego compactou o solo na camada de 0,00 – 0,15 m, quando comparado com área sem tráfego (Lopes et al., 2004). Para diminuir a compactação do solo os autores recomendaram o arraste da madeira em diferentes trilhas dentro do talhão, evitando o tráfego maior que duas vezes na mesma linha.

Algumas alternativas para minimizar o impacto da compactação causada pelos diferentes manejos são sugeridos por Reichert et al. (2007) em uma revisão. Na pecuária eles sugerem o controle da umidade na entrada de animais na área e manter a superfície do solo com cobertura vegetal, controlando a altura de pastejo. O pisoteio animal apresentou pequeno efeito sobre as características físicas de um Podzólico Vermelho-Amarelo com textura

superficial franca, devido à manutenção de 1 Mg ha^{-1} de biomassa seca na superfície do solo (Silva et al., 2000b). Leão et al. (2004) atribuíram a menor degradação das propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico à menor lotação animal e, conseqüentemente, ao menor pisoteio e a maior quantidade de resíduos vegetais deixados na área. Lima et al. (2004) verificaram que em um sistema de pastejo intensivo rotacionado irrigado a pressão de preconsoidação foi superior ao sistema não irrigado, mostrando a umidade do solo como determinante na deformação do solo.

Embora áreas sob eucalipto possam apresentar adequada estrutura do solo, como verificado no eucalipto 20, a colheita florestal, quer seja manual ou mecanizada pode afetar negativamente essa estrutura, como observado no eucalipto 4,5. Segundo Greacen & Sands (1980) a recuperação da compactação em florestas pelo trabalho em profundidade é mais difícil que na agricultura, pela presença de galhos e grandes raízes. Dias Junior et al. (2007) verificaram que a operação de colheita de eucalipto em um Argissolo, Plintossolo e Latossolo causaram maior incremento da densidade após o tráfego do Forwarder em relação ao Feller Büncher e Harvester, nas camadas de 0,00 – 0,03 e 0,35 – 0,38 m. No entanto, oito anos após a colheita o solo apresentava valores de densidade semelhantes aos valores anteriores ao tráfego, que aumentaram novamente devido à nova colheita. Os autores creditaram a regeneração estrutural no horizonte superficial do solo aos poros verticais preservados pelo cultivo mínimo, aumentando a infiltração de água, e a matéria orgânica aumentando a agregação, além da macro e mesofauna atuando na melhoria da estrutura do solo. Em profundidade, a subsolagem facilitou a penetração das raízes que ao se decompor contribuíram para a infiltração de água, além disso, a absorção de água pelas raízes pode causar contração do solo próximo às raízes, contribuindo para a agregação do solo.

Algumas estratégias têm sido sugeridas para minimizar a compactação em áreas florestais. Andrade et al. (2000) sugerem a utilização de carretas com eixo em tandem (dois eixos conjugados) e, se possível, com pneus florestais, o que aumentará a área de contato entre os pneus e o solo, resultando em melhor distribuição da pressão sobre o solo e a disposição dos resíduos nas linhas de tráfego das máquinas. Fernandes & Souza (2003) sugerem que as máquinas usadas na colheita florestal deveriam utilizar pneus com baixa pressão e alta flutuação para atenuar a compactação. Seixas et al. (1998) constataram que os resíduos (galhos, folhas e cascas) da colheita de madeira de eucalipto nas trilhas dentro da floresta serviram para minimizar a compactação do solo pelo tráfego de máquinas da colheita florestal em um solo com 900 g kg^{-1} de areia, 50 g kg^{-1} de silte e 50 g kg^{-1} de argila. A redução média no nível de compactação nos tratamentos com cobertura, avaliado através da

densidade, foi de 56% em relação ao tratamento com tráfego em contato direto com o solo. Seixas e Oliveira Júnior (2001) verificaram que a umidade facilita a reestruturação das partículas, tendo a densidade do solo variado entre 3,7 e 17,4% na condição seca, e entre 12,3 e 41,7% na condição úmida, no tráfego do módulo Harvester + Forwarder. Silva et al. (2007) observaram que à medida que aumentou a intensidade de tráfego de um “Forwarder” de duas para oito passadas ocorreu degradação da estrutura do solo, evidenciado pelo aumento dos valores de preconsolidação do solo, mesmo com a presença de galhada ou galhada + casca na área, embora a presença desses resíduos tenha minimizado o efeito da compactação. Uma passada do Harvester ou Harvester + Forwarder foi suficiente para aumentar a densidade e resistência à penetração do solo, sendo que apenas após várias passadas as características do solo favoráveis ao crescimento radicular foram excedidas (Ampoorter et al., 2007). Os autores sugerem trilhas de tráfego e o uso de espessa camada de resíduos nessas trilhas, pois dessa forma o peso da máquina se distribui em uma área maior do que apenas no rodado, diminuindo a pressão de contato.

No entanto, Horn et al. (2004) constataram que é nula a possibilidade das máquinas utilizadas na colheita florestal não causarem compactação nos solos, considerando que todas as máquinas utilizadas no estudo, com peso variando de 8,71 a 45 Mg, causaram impacto em um Cambissolo (aproximadamente 443 g kg⁻¹ de areia, 283 g kg⁻¹ de silte e 223 g kg⁻¹ de argila). Segundo os autores, a única solução funcional que comportariam com as exigências da indústria florestal moderna e uso sustentável do solo é estabelecer canais permanentes de tráfego localizados em áreas compactadas que permaneceriam utilizadas durante todas as atividades florestais.

Talvez a sugestão feita por Horn et al. (2004) seja a melhor alternativa para minimizar a compactação em áreas florestais pois, pelos resultados apresentados neste estudo, até mesmo o corte manual com retirada mecanizada das árvores comprometeu a estrutura do solo.

4.4. Conclusões

Os diferentes usos influenciam distintamente as características físico-hídricas do solo. A compactação aumenta a densidade e diminui a macroporosidade e porosidade total do solo, e ocorre até a camada de 0,40 m no eucalipto 4,5 e até a camada de 0,10 m na pastagem.

O eucalipto 20 possui potencial para ser utilizado em áreas de recuperação, sem objetivo comercial. Em áreas comerciais há possibilidade de compactação após o tráfego de máquinas ou pisoteio animal.

A floresta e a pastagem, apresentam nível de compactação intermediário e maior disponibilidade de água. O eucalipto 20 possui baixo nível de compactação e menor armazenaneto de água, com semelhança ao eucalipto 4,5, que possui o maior nível de compactação.

O parâmetro S é pouco sensível para detectar as diferenças entre os usos, sendo necessário definir faixas mais adequadas para as condições avaliadas.

4.5. Referências

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

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

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

ALDERFER, R.B.; MERKLE, F.G. Structural and permeability of native forest soils compared with cultivated areas of the same soil type. **Soil Science Proceedings**, v.6, p.98-103, 1941.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum**, v.26, p.27-34, 2004.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.E.A.S.; HIPÓLITO, J.L.; CASTILHO, S.R. Propriedades físicas e infiltração de água de um Latossolo Vermelho Amarelo (Oxisol) do noroeste do estado de São Paulo, Brasil, sob três condições de uso e manejo. **Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe**, v.30, p.167-180, 2005.

AMPOORTER, E.; GORIS, R.; CORNELIS, W.M.; VERHEYEN, K. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. **Forest Ecology and Management**, v.241, p.162-174, 2007.

ANDRADE, S.C.; SOUZA, A.P.; SILVA, E.; NASCIMENTO, A.G.; MACHADO, C.C.;

LEITE, H.G.; MINETTI, L.J. Análise dos efeitos da compactação do solo sobre a regeneração das cepas de eucalipto. **Revista Árvore**, v.24, p.261-268, 2000.

ANTUNES, L.O. **Estoque e labilidade da matéria orgânica em um Argissolo sob sistemas de produção de eucalipto**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal Pelotas, Pelotas.

AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Ed. Pallotti, 2004. 100p.

BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. **Soil Science**, v.68, p.1-13, 1949.

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, v.32, p.59-62, 1980.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; SOUZA, Z.M. Influência da compactação e do cultivo de soja nos atributos físicos e na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho. **Irriga**, v.8, p.242-249, 2003.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

BOTELHO, M.R. **Avaliação da cor e comportamento espectral de algumas classes de solos do Rio Grande do Sul**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRAIDA, J.A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. da; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.

BRANDT, A.A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BUTIÁ (Rio Grande do Sul). Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Buti%C3%A1_\(Rio_Grande_do_Sul\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Buti%C3%A1_(Rio_Grande_do_Sul))>. Acesso em: 8 jan. 2008.

CARPENEDO, V.; MILENICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolo Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p.99-105, 1990.

CAVENAGE, A.; MORAES, M.L.T.; ALVES, M.C.; CARVALHO, M.A.C.; FREITAS, M.L.M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.997-1003, 1999.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUCK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.323-327, 1983.

COLLARES, G.L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

COSTA, L.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, O.V.; OLSZEWSKI, N.; NACIF, P.G.S. Manejo do solo e sustentabilidade do sistema. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. (CD-ROM)

DE MARIA, I.C., CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.703-709, 1999.

DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter**. USA: Decagon Devices, 2000. 70p.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004a.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma**, v.120, p.215-225, 2004b.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v.120, p.227-239, 2004c.

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.257-264, 2007.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil water retention curve**. version 3. Piracicaba, 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FERNANDES, H.C.; SOUZA, A.P. Compactação de solos florestais: uma questão para estudo. **Revista Árvore**, v.25, p.387-392, 2001.

FERNANDES, H.C.; SOUZA, A.P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". **Revista Árvore**, v.27, p.279-284, 2003.

FERNANDES, H.C.; VITÓRIA, E.L. Avaliação dos níveis de compactação de um solo florestal em relação à trafegabilidade das máquinas. **Revista Árvore**, v.22, p.521-526,

1998.

FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L.; BÜL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.49-57, 2006.

GATE, O.P.; CZYZ, E.A.; DEXTER, A.R. Soil physical quality, S, as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils. In: ISTRO TRIENNIAL CONFERENCE, 17., 2006, Kiel, Alemanha. **Proceedings...** Kiel: ISTRO, 2006b. p.258-264. CD-ROM

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 em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.477-484, 2004.

GOMES, A.S.; PATELLA, J.F.; PAULLETO, E.A. Efeitos de sistemas e tempo de cultivo sobre a estrutura de um solo Podzólico Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.17-21, 1978.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.32, p.180-186, 1968.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, p.163-169, 1980.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v.6, p.65-100, 1987.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, v.79, p.207-219, 2004.

KEMPER, W.D. Aggregate stability. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Part 1. Madison, Wisconsin. ASA. 1965. p. 511-519.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Part 1. Madison, Wisconsin. ASA. 1965. p. 499-510.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-660.

LANZANOVA, M.E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. 2005. 125f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1994. p.37-51. (SSSA Special Publication, 35)

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.415-423, 2004.

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

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; GUBIANI, P.I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.36, p.1172-1178, 2006.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.945-951, 2004.

LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.677-684, 2005.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C. Compactação de um Latossolo causada pelo tráfego do “track skidder”. **Engenharia na Agricultura**, v.12, p.271-279, 2004.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C.; RINALDI, P.C.N. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**, v.30, p.369-376, 2006.

MARTINS, S.S.; COUTO, L.; TORMENA, C.A.; MACHADO, C.C. Impactos da exploração madeireira em florestas nativas sobre alguns atributos físicos do solo. **Revista Árvore**, v.22, p.69-76, 1998.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, p.963-969, 2004.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2.ed. American Society of Agronomy, Monograph, v.9, 1986. p.799 – 823.

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

PÉREZ GOMAR, E. **Qualidade física de um Vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio**. 2005. 85 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

RAB, M.A. Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. **Forest Ecology and Management**, v.191, p.329 – 340, 2004.

RADFORD, B.J.; BRIDGE, B.J.; DAVIS, R.J.; McGARRY, D.; PILLAI, U.P.; RICKMAN, J.F.; WALSH, P.A.; YULE, D.F. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil & Tillage Research**, v.54, p.55-170, 2000.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2004. 478p.

REICHERT, J.M.; REINERT, J.M.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume v. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.V.; SUZUKI, L.E.A.S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 16., 2006, Aracaju, **Palestras...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. CD-ROM

ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C. de; MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.241-248, 1991.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Solos, 2006. 306p.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.797-804, 2004.

SEIXAS, F. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Circular Técnica**, n.163, 1988.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **Scientia Florestalis**, v.60, p.73-87, 2001.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D.; SOUZA, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Florestalis**, v.54, p.9-16, 1998.

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

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

SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M.S.; LEITE, F.P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsoidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.89-93, 2007.

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

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

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.842-847, 2006a.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; VILAS BOAS, J.E.B. Crescimento e nutrição de eucalipto em resposta à compactação de latossolos com diferentes umidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.759-768, 2006b.

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

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.191-199, 2000b.

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

SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. **Soil & Tillage Research**, v.35, p.5-22, 1995.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.83-91, 1999.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em

propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.755-760, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S.; ALVES, M.C. Produtividade do milho (*Zea mays* L.) influenciada pelo preparo do solo e por plantas de cobertura em um Latossolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, v.26, p.61-65, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Teor de argila de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. 1 CD-ROM

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; KAISER, D.R.; KUNZ, M.; PELLEGRINI, A.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Areia total de solos sob diferentes tempos de agitação horizontal, tempo de contato do dispersante químico e dispersão mecânica. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004b. 1 CD-ROM

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

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

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

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 & Tillage Research**, v.92, p.104-113, 2007.

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

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society of Agronomy**, v.28. p.337-351, 1936.

5. CAPÍTULO 2

COMPRESSIBILIDADE DE UM ARGISSOLO SOB FLORESTA E PASTAGEM

5.1. Introdução

A pressão de preconsolidação, que indica a capacidade de suporte de carga do solo, e o índice de compressão, que informa a suscetibilidade do solo à compactação, são obtidos da curva de compressão do solo, que considera a relação entre o índice de vazios ou densidade do solo com o logaritmo da pressão aplicada (Holtz & Kovacs, 1981; Dias Junior & Pierce, 1996). Quando as pressões aplicadas ao solo são menores que a pressão de preconsolidação, ocorrem deformações elásticas (recuperáveis) no solo e as propriedades físicas sofrem alterações pouco significativas. Por outro lado, se as pressões forem maiores que a capacidade de suporte de carga do solo, ocorrem deformações plásticas (não recuperáveis) e as propriedades físicas do solo alteram-se consideravelmente (Holtz & Kovacs, 1981; Lebert & Horn, 1991). Portanto, a redução do volume do solo com conseqüente aumento da densidade pode ou não causar compactação adicional ao solo (Dias Junior & Pierce, 1996).

Nesse sentido, Alakuku et al. (2003) dizem que as máquinas e equipamentos utilizados em áreas sob condições críticas deveriam ser ajustados à atual resistência do subsolo, controlando as cargas por rodado e usando pneu de baixa pressão de insuflagem.

O efeito da compactação não ocorre apenas na planta, através da restrição ao crescimento radicular com conseqüências para a parte aérea e produtividade (Queiroz-Voltan et al., 2000), mas também influenciam o meio ambiente. Nas atividades agrícola e florestal, a deformação e o cisalhamento do solo pela compactação e a erosão hídrica são considerados os processos mais prejudiciais, contribuindo para a poluição da água com escoamento superficial, emissão de gases e alta exigência energética para obter elevadas produtividades (Horn, 2003).

Portanto, é importante avaliar a capacidade que um solo possui de ser usado para práticas agrícolas, florestais ou pastagem, podendo-se, dessa forma, manejá-lo da melhor forma possível e evitar sua degradação (Reichert et al., 2007). Solos de floresta natural com

baixos valores de densidade do solo e pressão de preconsolidação, e alta permeabilidade, por exemplo, são altamente vulneráveis à compactação do solo (Horn et al., 2004).

Considerando a importante informação fornecida pela pressão de preconsolidação para manutenção da estrutura do solo, trabalhos vêm sendo realizados na área agrícola (Kondo & Dias Junior, 1999; Suzuki, 2005; Lima et al., 2006a), pecuária (Kondo & Dias Junior, 1999; Lima et al., 2004b; Pérez Gomar, 2005) e florestal (Dias Junior et al., 1999; Dias Junior et al., 2003; Dias Junior et al., 2007). Mas ainda poucos trabalhos foram realizados sobre esse assunto e muitas questões ainda persistem, principalmente na área pecuária e florestal.

A manutenção da estrutura do solo em áreas florestais é mais complexo que em áreas agrícolas e de pecuária, pois, nas áreas florestais, as máquinas utilizadas na colheita são mais pesadas, causando grandes danos ao solo; além disso, o intenso tráfego na área para retirada da madeira degradam ainda mais a estrutura do solo.

Conhecendo-se o comportamento compressivo do solo, estratégias devem ser criadas de modo a manejá-lo de forma a evitar ou minimizar os danos à sua estrutura, o que poderia comprometer tanto o crescimento e desenvolvimento das plantas quanto o meio ambiente.

O conhecimento do comportamento compressivo do solo é importante para evitar a compactação adicional, mantendo ou até melhorando sua estrutura (Lebert & Horn, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996). No entanto, a determinação da compressibilidade do solo é demorada, o equipamento utilizado para sua determinação é relativamente caro e há a necessidade de um grande número de amostras devido à elevada variabilidade dos dados. Considerando a aplicação de oito cargas no teste de compressão e, para cada carga, o tempo de aplicação de 5 minutos, cada amostra de solo levaria no mínimo 40 minutos para determinação da curva de compressibilidade. Uma alternativa para obtenção da compressibilidade do solo de uma maneira mais simples seria sua estimativa através de funções baseadas nas propriedades físicas do solo, que são mais simples de obter.

Mas essa estimativa não é tão simples, pois muitas propriedades físicas variam com os solos, como por exemplo a densidade, a umidade e a resistência à penetração.

Trabalhos relacionando as propriedades físicas e mecânicas do solo vem sendo realizados, no exterior (Alexandrou & Earl, 1998; Canarache et al., 2000; Mosaddeghi et al., 2003; Horn & Fleige, 2003) e no Brasil (Imhoff et al., 2004; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c). No exterior os estudos têm sido principalmente em solos revolvidos, enquanto no Brasil têm-se baseado em solos não revolvidos.

A pressão de preconsolidação tem sido estimada por funções de pedotransferência considerando a textura, a agregação e a umidade do solo (Horn & Fleige, 2003) e pela

resistência à penetração (Canarache et al., 2000; Mosaddeghi et al., 2003; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c). Trabalhos ainda têm apresentado relação entre pressão de preconsolidação e umidade (Reinert, 1990; Imhoff et al., 2001; Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2004; Mosaddeghi et al., 2006; Lima et al., 2006c) e densidade do solo (Imhoff et al., 2001; Reinert, 1990; Alexandrou & Earl, 1998).

Reichert et al. (2007) sugerem duas formas para obter valores críticos de pressão de preconsolidação: pela resistência à penetração e pela densidade do solo. Segundo os autores, um valor crítico de pressão de preconsolidação estimado pela resistência à penetração facilitaria a tomada de decisão no campo.

É importante prever os danos causados pelos sistemas de uso do solo de modo a evitá-los ou minimizá-los, pois os danos podem ser de longa duração. Rab (2004) verificou que o solo de floresta apresentou uma recuperação muito lenta da compactação e perturbação do subsolo. Grigal (2000), revisando os efeitos do manejo extensivo da floresta na produtividade do solo, constatou que as alterações nas propriedades físicas do solo são extensivas e imediatas, afetando as propriedades químicas e biológicas e a produtividade. Froehlich et al. (1985) constataram que a recuperação da camada superficial (5,1 cm) é mais rápida do que as demais camadas, nas linhas de tráfego de colheita de árvores no centro-oeste de Idaho. No período de avaliação de 25 anos, apenas essa camada e do solo originado de material granítico recuperou sua densidade, enquanto as demais camadas e o solo originado de material vulcânico não recuperou seus valores de densidade anterior ao tráfego.

Este estudo teve como objetivo avaliar a compressibilidade de um Argissolo Vermelho distrófico submetido a distintos sistemas de uso e estimá-la por meio de propriedades físicas.

5.2. Material e métodos

5.2.1. Descrição das áreas de estudo

A área de estudo está localizada no município de Butiá, situado na região fisiográfica Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense) do Estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 30°06'06" de latitude Sul e 51°52'18" de longitude Oeste.

Pelo sistema de Köppen o clima da região é do tipo “Cfa” – Clima Subtropical, úmido, sem estiagem. A temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C e a do mês menos quente é de 3 a 18 °C.

O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2006) Tb A moderado textura média/argilosa com cascalhos relevo suave ondulado e ondulado e substrato granito.

Os usos e suas características foram os seguintes:

a) Floresta: floresta antropizada constituída por espécies arbóreas e arbustivas com altura de aproximadamente quatro metros, utilizada como abrigo pelos bovinos. Devido à possibilidade dos bovinos conseguirem ter acesso a esse ponto de coleta nos períodos mais secos, essa área foi denominada de floresta antropizada.

b) Pastagem: pastagem com cinco anos de idade, constituída de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium sp.*). A pastagem foi instalada em uma área de 1200 ha⁻¹ sob preparo convencional no ano de 2001 (Figura 3b). Anterior ao plantio da pastagem a área foi constituída por floresta natural e em seguida foi utilizada com pastagem e soja.

c) Eucalipto 20: povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento no ano de 1986 (Figura 3c). Anterior ao plantio do eucalipto a área foi constituída por pastagem.

d) Eucalipto 4,5: plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2^a rotação, com 4,5 anos de idade. O plantio original ocorreu em 1993, com preparo do solo em faixa e escarificador de três hastes (Figura 4). A colheita do eucalipto no primeiro corte, aos 8,5 anos de idade, foi feita manualmente com motosserra e a extração da madeira realizada com Forwarder Valmet 890 com capacidade de carga de 18 Mg, sem queima do resíduo vegetal. O tráfego para colheita do eucalipto no primeiro corte foi aleatório, com número de passadas podendo chegar a 16. O segundo plantio foi feito nas entrelinhas no ano de 2002 (Figura 3d). Anterior ao plantio original ocorrido em 1993, a área foi utilizada com soja e pastagem.

5.2.2. Coleta de amostras

No mês de setembro do ano de 2006 foram realizadas as coletas de amostras com estrutura preservada e alterada. As amostras de solo utilizadas nesse capítulo foram as mesmas utilizadas no Capítulo 1.

Para coleta das amostras com estrutura preservada foram abertas três trincheiras em cada tratamento, e em cada trincheira coletaram-se duas amostras por camada de solo, totalizando seis repetições por camada. As amostras foram coletadas em cilindros de 2,5 cm de altura e 6,1 cm de diâmetro, nas camadas de 0,025 - 0,05; 0,10 - 0,125 e 0,20 - 0,225 m.

A coleta de amostras com estrutura alterada foi realizada em três trincheiras dentro de cada área do tratamento, nas camadas de 0,00 – 0,05; 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m. No laboratório, para cada trincheira foram feitas duas repetições, totalizando seis repetições por tratamento.

5.2.3. Compressibilidade

As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade e equilibradas à tensão de 33 kPa, utilizando-se câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). Em seguida, foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, no consolidômetro de modelo S-450 Terraload (Durham Geo- Interprises) com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga foi aplicada por um tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga.

Calculou-se antes do teste de compressão a umidade volumétrica (θ_i), o grau de saturação (G_{Si}) e a densidade do solo (DS_i). Com base no deslocamento vertical medido em laboratório no consolidômetro após a aplicação de cada carga, foram calculadas ao final do teste a densidade (DS_f) e a deformação (Def) do solo. O índice de compressão (C_c) e a pressão de preconsolidação (σ_p) foram calculados pelo método de Casagrande (Casagrande, 1936) com ajuste manual dos dados no programa computacional Compress (Reinert et al., 2003).

5.2.4. Permeabilidade ao ar

A permeabilidade do solo ao ar foi realizada com a amostra de solo com estrutura preservada equilibrada na tensão de 33 kPa, utilizando um permeâmetro de ar semelhante ao descrito por Horn et al. (2004).

O cálculo da permeabilidade foi realizado pela equação:

$$K = \rho \times g \left(\frac{\Delta v \times L}{\Delta t \times \Delta p \times A} \right)$$

Onde: K = permeabilidade ao ar ($m \ s^{-1}$); ρ = densidade do ar no momento da medição ($kg \ m^{-3}$); g = aceleração da gravidade ($m \ s^{-2}$); Δv = leitura no fluxímetro (m^3); L = altura do cilindro (m); Δt = tempo (minutos); Δp = pressão de ar aplicada (hPa); A = área do cilindro (m^2).

Utilizou-se: $\rho = 1,169 \ kg \ m^{-3}$; $g = 9,81 \ m \ s^{-2}$; $\Delta t = 1$ minuto; $\Delta p = 1$ hPa;

A densidade do ar foi calculada pela equação:

$$\rho = \rho_n \left(\frac{T_n \times p}{p_n \times T} \right)$$

Onde: ρ = densidade do ar no momento da medição (kg m^{-3}); ρ_n = densidade do ar padrão (kg m^{-3}); T_n = temperatura padrão ($^{\circ}\text{K}$); p = pressão atmosférica na medição (mbar); p_n = pressão atmosférica padrão (mbar); T = temperatura na medição ($^{\circ}\text{K}$).

Utilizou-se: ρ_n (pressão atmosférica de 1013 mbar e temperatura de $273,15^{\circ}\text{K}$) = $1,293 \text{ kg m}^{-3}$; T_n (0°C) = $273,15^{\circ}\text{K}$; p = 1000 mbar; p_n = 1013 mbar; T (25°C) = $298,15^{\circ}\text{K}$.

5.2.5. Porosidade, densidade e condutividade hidráulica do solo saturado

As amostras foram saturadas e realizada a condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório, utilizando-se um permeâmetro de carga constante (Libardi, 2005). Em seguida, as amostras foram encaminhadas à mesa de tensão para determinação da macroporosidade, onde permaneceram por aproximadamente dois dias e, em seguida, encaminhadas à estufa por mais dois dias para determinação da microporosidade, porosidade total (EMBRAPA, 1997) e densidade do solo (Blake & Hartge, 1986).

5.2.6. Diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados

Agregados de tamanho menor que 8 mm foram selecionados para determinação do diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água. Para essa determinação os agregados foram agitados em um aparelho de oscilação vertical (Yoder, 1936), com peneiras de malha de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm.

O DMP foi calculado pela seguinte equação:

$$DMP = \frac{\sum_{i=1}^n (mAGRi \times ci)}{\sum_{i=1}^n mtAGRi}$$

Onde: DMP = diâmetro médio ponderado do tamanho de agregados; $mAGRi$ = massa de agregados (gramas) na classe i ; ci = valor médio da classe de agregados i ; $mtAGRi$ = massa total de agregados (gramas).

5.2.7. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo a penetração foi avaliada com um penetrômetro de impacto (Stolf et al., 1983), na entrelinha dos plantios (entre quatro árvores). Utilizou-se a resistência à penetração média das camadas de 0,025 - 0,05; 0,10 - 0,125 e 0,20 - 0,225 m.

No momento da avaliação da resistência à penetração a umidade gravimétrica média das camadas de 0,025 - 0,05; 0,10 - 0,125 e 0,20 - 0,225 m era de 0,25 kg kg⁻¹ na floresta, 0,24 kg kg⁻¹ na pastagem, 0,19 kg kg⁻¹ no eucalipto 20 e 0,20 kg kg⁻¹ no eucalipto 4,5.

Considerando que a resistência à penetração é função da umidade e densidade do solo, utilizou-se para o ajuste da resistência à penetração o modelo não linear proposto por Busscher (1990): $RP = a\theta^b Ds^c$, onde: RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é a umidade volumétrica (m³ m⁻³), Ds é a densidade do solo (Mg m⁻³) e a , b , c são coeficientes empíricos de ajuste. Esses coeficientes do modelo não linear foram obtidos pelo método de Gauss-Newton.

5.2.8. Análise estatística

Os resultados foram analisados por contrastes ortogonais considerando 5% de significância pelo teste de Tukey e por análise de correlação de Pearson e análise de regressão entre os parâmetros avaliados

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Compressibilidade dos diferentes usos do solo

As diferenças nos valores médios (Tabela 15) de θ_i , GSi e permeabilidade ao ar (PAA) foram significativas para alguns usos (Tabela 17), enquanto para a Def essa diferença não foi observada (Tabela 17).

A PAA aumentou com a redução da θ_i e do GSi, pois quanto menos poros, principalmente macroporos, estiverem preenchidos com água, maior será a PAA. A pastagem e o eucalipto 4,5 por apresentarem maior DSi (Tabela 16), aumentam os poros de menor diâmetro, contribuindo para a retenção de água na tensão de 33 kPa, utilizada para equilibrar as amostras de solo, fato que explica a maior θ_i e GSi nesses usos. A elevada PAA pode indicar tanto uma boa estrutura quanto um solo sem estrutura. Durante a compactação ou compressão do solo, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente poros que retêm água. Esse decréscimo da porosidade de aeração pode ser 1,5-2 vezes maior que o decréscimo no espaço poroso total (Boone & Veen, 1994). No entanto, a diminuição do coeficiente de difusão do oxigênio vai

depender da geometria e estabilidade dos canais de poros de aeração e do grau de deformação durante a compactação (Boone & Veen, 1994). Quanto maior a deformação do solo, maior serão as reduções de macroporosidade e de porosidade total do solo (Silva et al., 2000).

Os diferentes valores médios de D_{Si}, D_{Sf}, σ_p e CC (Tabela 16) foram significativos entre alguns usos (Tabela 18).

Tabela 15 - Valores médios de θ_i , G_{Si}, PAA e Def para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | Média |
|-------------------------|----------|----------|--------------|---------------|--------|
| $\theta_i, m^3 m^{-3}$ | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,3142 | 0,3040 | 0,2304 | 0,2587 | 0,2768 |
| 0,10-0,125 | 0,2893 | 0,3123 | 0,2484 | 0,2587 | 0,2784 |
| 0,20-0,225 | 0,3006 | 0,2972 | 0,2557 | 0,2683 | 0,2804 |
| Média | 0,3013 | 0,3045 | 0,2446 | 0,2619 | |
| G _{Si} , % | | | | | |
| 0,025-0,05 | 66,52 | 69,62 | 36,65 | 68,45 | 60,96 |
| 0,10-0,125 | 57,07 | 67,39 | 45,87 | 63,23 | 59,53 |
| 0,20-0,225 | 61,73 | 61,94 | 50,33 | 62,02 | 59,00 |
| Média | 61,78 | 66,12 | 44,58 | 64,57 | |
| PAA, mm h ⁻¹ | | | | | |
| 0,025-0,05 | 17,29 | 26,09 | 345,11 | 19,17 | 82,36 |
| 0,10-0,125 | 34,55 | 15,09 | 192,70 | 27,53 | 67,82 |
| 0,20-0,225 | 19,03 | 16,11 | 66,33 | 26,36 | 32,32 |
| Média | 24,20 | 19,10 | 191,11 | 23,95 | |
| Def, mm | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,5517 | 0,5120 | * | 0,4817 | 0,5153 |
| 0,10-0,125 | 0,6733 | 0,5383 | 0,6400 | 0,5367 | 0,5885 |
| 0,20-0,225 | 0,6250 | 0,5933 | 0,7683 | 0,5317 | 0,6296 |
| Média | 0,6167 | 0,5500 | 0,7362 | 0,5167 | |

θ_i = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial); G_{Si} = grau de saturação na tensão de 33 kPa; PAA = permeabilidade ao ar; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial. * não determinado.

Quanto maior a DSi , menor a Def e o CC . O solo apresenta uma densidade máxima. Quando a densidade do solo é elevada, significa que ele já apresentou uma deformação próxima da densidade máxima que pode ser alcançada. De maneira geral, quanto menor a densidade do solo, maior deformação ocorrerá até alcançar a densidade máxima. E quanto menor a Def que esse solo sofrer, menos suscetível à compactação ele será. A menor deformação indica proximidade da densidade máxima do solo e, conseqüentemente, o solo não conseguiria deformar ou compactar além dessa densidade. Powers et al. (2005) observaram que a densidade do solo aumentou com o incremento da compactação, sendo esse aumento maior em solos com densidade inicial baixa ou moderada, enquanto que para solos com densidade superior esse aumento foi pequeno, fato atribuído à dificuldade de compressão dos poros menores, originados pela elevada densidade, preenchidos com água. Portanto, o ideal seria um grau de compactação intermediário, pois em um baixo grau de compactação o solo terá maior deformação e será mais suscetível à compactação, enquanto um elevado grau de compactação, embora o solo deforme menos e seja menos suscetível à compactação, ele estará próximo a sua densidade máxima. A σ_p entre os usos foi semelhante e, no caso do eucalipto 4,5, baixa em relação ao verificado na literatura. O tipo de argilomineral e arranjo das partículas desse solo parecem ter maior influência na σ_p do que propriamente o uso do solo. A pressão causada no solo por máquinas florestais e pelo casco de um cavalo pode superar 300 kPa (Horn et al., 2004). Pérez Gomar (2005) verificou em um Vertissolo pastejado valores de σ_p de 45,53 e 43,00 kPa para a área com 20 animais ha^{-1} e 47,53 e 40,05 kPa para a área com 40 animais ha^{-1} , respectivamente para as tensões de 33 e 10 kPa, em um Vertissolo. Lima et al. (2004b) observaram valores de 268 e 246 kPa, respectivamente, para pastejo intensivo rotacionado irrigado e não irrigado, com amostras equilibradas na tensão de 10 kPa. Lima et al. (2004a) observaram em amostras de solo equilibradas na tensão de 10 kPa valores de σ_p de 316 kPa na projeção da copa da laranjeira, 309 e 298 kPa no rodado e entre rodado do trator e 174 kPa na linha de cultivo. Kondo & Dias Junior (1999) trabalhando com três Latossolos sob cultura anual, mata natural e pastagem, verificaram, na zona de friabilidade, pressões variando de 154 a 167 kPa para um Latossolo Vermelho-Amarelo, 77 a 183 kPa para um Latossolos Roxo e de 77 a 132 kPa para um Latossolo Vermelho-Escuro.

Horn & Fleige (2003) propuseram uma classificação para a pressão de preconsolidação, considerando umidade ($pF = 1,8$ e $2,5$), densidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os autores classificaram a pressão de preconsolidação em muito baixa (< 30 kPa), baixa (30-60 kPa), média (60-90 kPa), alta (90-120 kPa), muito alta (120-150 kPa) e

extremamente alta (> 150 kPa). Baseado nessa classificação, a σ_p nesse estudo é baixa, indicando que cuidados devem ser tomados em relação às características das máquinas utilizadas na área (peso das máquinas, tipo de pneu e pressão de insuflagem) e a umidade do solo durante o tráfego de máquinas ou pisoteio animal.

Tabela 16 - Valores médios de DSi, DSf, σ_p e Cc para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | Média |
|-------------------------|----------|----------|--------------|---------------|-------|
| DSi, Mg m ⁻³ | | | | | |
| 0,025-0,05 | 1,28 | 1,38 | 1,03 | 1,51 | 1,31 |
| 0,10-0,125 | 1,25 | 1,36 | 1,19 | 1,47 | 1,33 |
| 0,20-0,225 | 1,30 | 1,29 | 1,23 | 1,44 | 1,31 |
| Média | 1,28 | 1,34 | 1,15 | 1,47 | |
| DSf, Mg m ⁻³ | | | | | |
| 0,025-0,05 | 1,65 | 1,73 | * | 1,87 | 1,75 |
| 0,10-0,125 | 1,72 | 1,72 | 1,79 | 1,86 | 1,77 |
| 0,20-0,225 | 1,73 | 1,69 | 1,78 | 1,82 | 1,75 |
| Média | 1,70 | 1,71 | 1,78 | 1,85 | |
| σ_p , kPa | | | | | |
| 0,025-0,05 | 47,53 | 44,56 | 31,24 | 46,00 | 42,74 |
| 0,10-0,125 | 48,13 | 35,53 | 42,20 | 42,27 | 42,02 |
| 0,20-0,225 | 39,35 | 34,42 | 46,47 | 50,92 | 42,79 |
| Média | 45,01 | 37,79 | 40,25 | 46,39 | |
| Cc | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,25 | 0,21 | 0,60 | 0,18 | 0,30 |
| 0,10-0,125 | 0,33 | 0,22 | 0,43 | 0,21 | 0,29 |
| 0,20-0,225 | 0,28 | 0,25 | 0,38 | 0,21 | 0,28 |
| Média | 0,29 | 0,23 | 0,47 | 0,20 | |

DSi = densidade do solo antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial; DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão.* não determinado.

Silva et al. (2002a) e Silva et al. (2002b) apresentaram valores de σ_p para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto em função do estado inicial de compactação ou densidade do solo (Silva et al., 2002a) e em função do grau de saturação em água (Silva et al., 2002b). Considerando uma faixa de densidade de 1,31 – 1,45 Mg m⁻³ para a camada de 0,10 – 0,12 m do Argissolo, a σ_p obtida por Silva et al. (2002a) foi de 62,3 kPa. Enquanto que para um grau de saturação de 61 – 75% a σ_p obtida por Silva et al. (2002b) foi de 119,3 kPa. Pelos resultados de Silva et al. (2002a, b) com aumento da faixa de densidade e decréscimo da faixa de grau de saturação há aumento da σ_p . Baseado nos resultados de Silva et al. (2002a, b) os valores de σ_p obtidos nesse estudo também são baixos.

Horn et al. (2004) verificaram que um Cambissolo sob floresta foi muito suscetível à compactação, tendo valores de preconsolidação inferiores a 60 kPa.

Tabela 17 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,025-0,05 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | θ_i (m ³ m ⁻³) | GSi (%) | PAA (mm h ⁻¹) | Def (mm) |
|-------------------------------|---|------------|------------------------------|-------------|
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ** | ** | ** | - |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | ** | ** | - |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | * | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ns | ** | ** | - |

θ_i = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial); GSi = grau de saturação na tensão de 33 kPa; PAA = permeabilidade ao ar; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial. – não determinado. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

De modo geral o eucalipto 20 contrastou significativamente com os demais usos para as variáveis θ_i , GSi, PAA, Def e Cc na camada de 0,025 – 0,05 m (Tabelas 17 e 18). Esse contraste do eucalipto 20 com os demais usos parece indicar uma estrutura muito frágil do solo nesse manejo. Trabalhos indicam que uma compactação moderada é ideal para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Suzuki, 2005), e, quem sabe, para a qualidade

ambiental. Nesse sentido, considerando a equação proposta por Reichert et al. (2007), que relaciona a densidade do solo quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero e a argila, a densidade crítica para esse solo é de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, utilizando um teor médio de argila de 482 g kg^{-1} , logo, verifica-se que o eucalipto 20 apresenta uma baixa compactação e o eucalipto 4,5 apresentam uma elevada compactação, enquanto a floresta e pastagem apresentam uma compactação moderada (Tabela 16).

Geralmente os contrastes ocorreram entre os usos com maior e menor valor dos parâmetros avaliados (Tabelas 19 e 20). Para o Cc praticamente todos os usos contrastaram significativamente entre si, enquanto para a σ_p não houve contraste significativo (Tabela 20).

Tabela 18 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,025-0,05 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | DSi (Mg m^{-3}) | DSf (Mg m^{-3}) | σ_p (kPa) | Cc |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|----|
| Floresta vs Pastagem | ns | ** | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ** | - | * | ** |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | - | ns | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | * | ** | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | - | * | ** |

DSi = densidade do solo antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial; DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão. – não determinado. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Assim como na camada de 0,025 – 0,05 m, de modo geral o eucalipto 20 contrastou significativamente com os demais usos para as variáveis θ_i , GSi, PAA, Def e Cc na camada de 0,20 – 0,225 m (Tabelas 21 e 22), enquanto para a DSi o eucalipto 4,5 que apresentou o maior valor, contrastou com os demais usos (Tabela 22). Para a σ_p não houve contraste significativo, na camada de 0,20 – 0,225 m, semelhante ao verificado para a camada de 0,10 – 0,125 m.

Assim como verificado por Lima et al. (2006b), embora a densidade do solo tenha sido influenciada pelos níveis de compactação, os valores de σ_p de um Argissolo Vermelho distrófico arênico (81 g kg^{-1} de argila) não o foram. Os autores associaram esse fato à alta

variabilidade dos dados de σ_p (representado pelo coeficiente de variação de 19,4 a 34,7%). Lima et al (2004b) também não observaram diferença significativa da σ_p entre sistemas de pastejo e atribuíram tal fato a variação dos dados (coeficiente de variação de 32,2 e 33,4%). Os dados de σ_p apresentados nesse estudo tiveram um coeficiente de variação entre 23,3 e 32,7%.

Tabela 19 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,10-0,125 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | θ_i ($m^3 m^{-3}$) | GSI (%) | PAA ($mm h^{-1}$) | Def (mm) |
|-------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|-------------|
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | * |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ** | ns |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | * |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | ** | ** | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | * | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ns | * | ** | ns |

θ_i = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial); GSI = grau de saturação na tensão de 33 kPa; PAA = permeabilidade ao ar; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Tabela 20 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,10-0,125 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | DSi ($Mg m^{-3}$) | DSf ($Mg m^{-3}$) | σ_p (kPa) | Cc |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----|
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | * |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | * |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | * |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | * | ns | ns | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ns | ** | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ns | ** |

DSi = densidade do solo antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial; DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsoidação; Cc = índice de compressão. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Tabela 21 - Contrastes ortogonais, valor de F e significância para os usos em estudo na camada de 0,20-0,225 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | θ_i ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) | GSI (%) | PAA (mm h^{-1}) | Def (mm) |
|-------------------------------|---|------------|-------------------------------|-------------|
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | * | * | * | * |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | * | * | ** | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ns | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ns | ** | * | ** |

θ_i = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial); GSI = grau de saturação na tensão de 33 kPa; PAA = permeabilidade ao ar; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Tabela 22 - Contrastes ortogonais e significância para os usos em estudo na camada de 0,20-0,225 m no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | DSi (Mg m^{-3}) | DSf (Mg m^{-3}) | σ_p (kPa) | Cc |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|----|
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | ** |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | * |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ns | ** | ns | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | ns |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ns | ns | ** |

DSi = densidade do solo antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial; DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Os dados de PAA apresentaram elevado coeficiente de variação, entre 26,64 e 95,82%, semelhante ao que se tem verificado na literatura para a condutividade hidráulica. Vários trabalhos têm demonstrado alta variabilidade dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado. Lima et al. (2006a), por exemplo, obtiveram, para condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório, um coeficiente de variação entre 111,5 a 247,9%. Genro Junior (2002) e Abreu et al. (2004) obtiveram, respectivamente, um coeficiente de variação de 104%

e 52,8% para a condutividade hidráulica saturada obtida no campo. Tanto a condutividade quanto a PAA estão associadas ao sistema poroso do solo, mais especificamente aos macroporos. Mesquita & Moraes (2004) dizem que a presença de um “megaporo” em uma amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas muito sua condutividade.

5.3.2. Estimativa da compressibilidade através de propriedades físicas do solo

A resistência à penetração é função da umidade, da densidade e da distribuição do tamanho de partículas do solo (Busscher, 1990; Canarache, 1990; Pabin et al., 1998). De modo a possibilitar comparações de resultados, Reichert et al. (2007) propõem padronizar os resultados de resistência à penetração através de modelos matemáticos passíveis de incluir variáveis como umidade e densidade do solo. Nesse sentido, eles citam a equação desenvolvida por Busscher (1990), que tem sido amplamente utilizada (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Tormena et al., 1999; Silva, 2003; Genro Junior et al., 2004; Collares et al., 2006; Lima et al., 2007).

A variação da θ_{RP} , DS_{RP} , RP e dos parâmetros utilizados no ajuste do modelo de Busscher (1990) esteve relacionada aos diferentes usos (Tabelas 23 e 24). As áreas sob eucalipto apresentaram os maiores coeficientes de variação.

A variação dos parâmetros físicos e mecânicos do solo estiveram relacionados aos diferentes usos (Tabelas 25, 26, 27 e 28). O eucalipto 20 e eucalipto 4,5 apresentaram, respectivamente, baixo e elevado nível de compactação, enquanto a floresta e pastagem obtiveram um nível de compactação intermediário. Esses níveis de compactação alteraram a relação massa/volume do solo, influenciando, principalmente, a porosidade, a densidade, a deformação do solo, a permeabilidade ao ar e a condutividade hidráulica.

A $K_{\theta S}$, a PAA e a Macro apresentaram elevado coeficiente de variação, o que é normal nesse tipo de análise.

A DS_f correlacionou-se significativa e positivamente com as diferentes frações da areia, DS_i e RP_{aj} , e negativamente com a argila, silte + argila, θ_{33kPa} , micro e PT (Tabela 29). Um aumento da fração areia e conseqüente redução da argila e silte+argila, aumentou a DS_f . Esse comportamento da DS_f em relação a argila segue o mesmo comportamento da DS_i , como relatado na literatura (Reinert et al., 2006). Com decréscimo da micro e da PT a θ_{33kPa} tende a diminuir, pois a água retida na tensão de 33 kPa está nos microporos, em conseqüência disso, os poros de maior diâmetro que não estão preenchidos com água são os primeiros a deformarem ao sofrer uma pressão, reduzindo o volume de solo e aumentando a DS_f .

Tabela 23 - Médias, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) da umidade volumétrica (θ_{RP} , $m^3 m^{-3}$), densidade (DS_{RP} , $Mg m^{-3}$) e resistência à penetração (RP) das camadas de 0,025-0,05 m, 0,10-0,125 m e 0,20-0,225 m, utilizadas no ajuste do modelo (Busscher, 1990).

| Variável | Média | Máximo | Mínimo | Desvio padrão | CV |
|---------------|--------|--------|--------|---------------|-------|
| Floresta | | | | | |
| θ_{RP} | 0,3200 | 0,3632 | 0,2899 | 0,02 | 6,39 |
| DS_{RP} | 1,28 | 1,43 | 1,20 | 0,06 | 4,51 |
| RP | 0,73 | 0,89 | 0,63 | 0,06 | 8,98 |
| Pastagem | | | | | |
| θ_{RP} | 0,3159 | 0,3366 | 0,2619 | 0,02 | 5,11 |
| DS_{RP} | 1,34 | 1,42 | 1,13 | 0,07 | 5,08 |
| RP | 0,92 | 1,22 | 0,74 | 0,13 | 14,39 |
| Eucalipto 20 | | | | | |
| θ_{RP} | 0,2318 | 0,2917 | 0,1779 | 0,03 | 14,99 |
| DS_{RP} | 1,15 | 1,36 | 0,96 | 0,13 | 11,12 |
| RP | 0,93 | 1,22 | 0,62 | 0,24 | 25,94 |
| Eucalipto 4,5 | | | | | |
| θ_{RP} | 0,2605 | 0,3020 | 0,2184 | 0,02 | 9,36 |
| DS_{RP} | 1,47 | 1,64 | 1,33 | 0,09 | 6,38 |
| RP | 0,89 | 1,22 | 0,62 | 0,19 | 21,92 |

θ_{RP} = Umidade volumétrica no momento da avaliação da resistência à penetração à campo; DS_{RP} = Densidade do solo no momento da avaliação da resistência à penetração à campo; RP = resistência do solo à penetração à campo.

Tabela 24 - Parâmetros empíricos de ajuste do modelo (Busscher, 1990) para os usos em estudo.

| Parâmetros | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 |
|------------|----------|----------|--------------|---------------|
| a | 0,3068 | 0,3250 | 0,3102 | 0,5355 |
| b | -0,4789 | -0,7195 | -0,5739 | -0,4639 |
| c | 1,2772 | 0,7380 | 1,7537 | -0,3118 |

Tabela 25 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para a Floresta.

| Variável | Média | Máximo | Mínimo | Desvio padrão | CV |
|-------------------------|--------|--------|--------|---------------|--------|
| $\theta_{33\text{kPa}}$ | 0,2982 | 0,3454 | 0,2651 | 0,02 | 8,07 |
| DMP | 2,40 | 3,41 | 1,50 | 0,73 | 30,24 |
| PAA | 24,20 | 81,05 | 0,00 | 23,13 | 95,59 |
| K_{0S} | 17,12 | 90,68 | 0,00 | 26,53 | 154,91 |
| Macro | 0,066 | 0,125 | 0,015 | 0,03 | 42,46 |
| Micro | 0,350 | 0,390 | 0,313 | 0,02 | 5,99 |
| PT | 0,416 | 0,443 | 0,398 | 0,02 | 3,97 |
| DSi | 1,28 | 1,43 | 1,20 | 0,06 | 4,51 |
| DSf | 1,70 | 1,77 | 1,60 | 0,05 | 3,02 |
| Def | 0,62 | 0,77 | 0,38 | 0,09 | 14,18 |
| RPaj | 0,75 | 0,81 | 0,66 | 0,04 | 4,98 |
| σ_p | 45,00 | 66,40 | 29,40 | 11,23 | 24,95 |
| Cc | 0,29 | 0,40 | 0,16 | 0,05 | 18,30 |

$\theta_{33\text{kPa}}$ = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DMP = diâmetro médio ponderado de agregados (mm); PAA = permeabilidade ao ar (mm h^{-1}); K_{0S} = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Macro = macroporosidade - poros de diâmetro maior que 0,06mm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Micro = microporosidade - poros de diâmetro menor que 0,06 mm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT = porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DSi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial (Mg m^{-3}); DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Mg m^{-3}); Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (mm); RPaj = resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo (Busscher, 1990) (MPa); σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); Cc = índice de compressão.

Houve correlação significativa e positiva entre Def e cascalho, argila, PAA, K_{0S} , Macro e PT, e negativa entre silte, $\theta_{33\text{kPa}}$, DMG e DSi (Tabela 29). A adesão da água com as partículas sólidas do solo, principalmente com a fração argila, pela sua maior área superficial específica e reatividade (Giasson, 2006; Inda Junior et al., 2006; Meurer et al., 2006) aumenta a deformação do solo, pois a água atua como um lubrificante das partículas sólidas, causando um rearranjo das partículas (Secco, 2003). A resistência do solo em diminuir seu volume quando submetido a uma pressão, é menos pronunciada em solos arenosos e menos agregados (Horn & Lebert, 1994). A uma mesma densidade do solo e a um mesmo potencial de água, o solo é mais compressivo quanto maior o conteúdo de argila e menor o conteúdo de substâncias orgânicas. A um mesmo conteúdo de argila, o solo é mais compressivo quanto menor a densidade e menor tensão de água (Horn & Lebert, 1994). Solos arenosos apresentam

maior atrito entre as partículas, o que dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (Lima et al., 2004a).

Tabela 26 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para a Pastagem.

| Variável | Média | Máximo | Mínimo | Desvio padrão | CV |
|------------------|--------|--------|--------|---------------|--------|
| θ_{33kPa} | 0,3057 | 0,3579 | 0,2341 | 0,03 | 9,26 |
| DMP | 2,55 | 3,72 | 1,03 | 0,77 | 30,12 |
| PAA | 19,10 | 50,54 | 7,12 | 11,30 | 59,18 |
| $K_{\theta S}$ | 14,38 | 121,45 | 1,37 | 27,69 | 192,58 |
| Macro | 0,064 | 0,163 | 0,036 | 0,03 | 43,59 |
| Micro | 0,352 | 0,375 | 0,286 | 0,02 | 5,68 |
| PT | 0,416 | 0,448 | 0,396 | 0,01 | 3,77 |
| DSi | 1,34 | 1,42 | 1,13 | 0,07 | 5,08 |
| DSf | 1,71 | 1,77 | 1,64 | 0,03 | 1,99 |
| Def | 0,55 | 0,87 | 0,45 | 0,09 | 17,13 |
| RPaj | 0,94 | 1,00 | 0,85 | 0,05 | 5,10 |
| σ_p | 37,79 | 59,90 | 21,30 | 12,24 | 32,39 |
| Cc | 0,23 | 0,39 | 0,18 | 0,05 | 21,18 |

θ_{33kPa} = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial) ($m^3 m^{-3}$); DMP = diâmetro médio ponderado de agregados (mm); PAA = permeabilidade ao ar ($mm h^{-1}$); $K_{\theta S}$ = condutividade hidráulica do solo saturado ($mm h^{-1}$); Macro = macroporosidade - poros de diâmetro maior que 0,06mm ($m^3 m^{-3}$); Micro = microporosidade - poros de diâmetro menor que 0,06 mm ($m^3 m^{-3}$); PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$); DSi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial ($Mg m^{-3}$); DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial ($Mg m^{-3}$); Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (mm); RPaj = resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo (Busscher, 1990) (MPa); σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); Cc = índice de compressão.

A PAA e a $K_{\theta S}$ ocorrem principalmente na macroporosidade, e os macroporos são os primeiros a deformar quando submetidos a uma pressão. Nesse sentido, um aumento da PAA, $K_{\theta S}$, Macro e PT são relacionados a uma maior deformação do solo.

A RPaj correlacionou-se significativa e positivamente apenas com a Macro, DSi e DSf (Tabela 29). A σ_p correlacionou-se significativa e positivamente com a DSi e a RPaj, e negativamente com a θ_{33kPa} . O Cc correlacionou-se significativa e positivamente com a PAA, $K_{\theta S}$ e a Def, e negativamente com o silte, a micro, a PT e a DSi (Tabela 29).

Tabela 27 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para o Eucalipto 20.

| Variável | Média | Máximo | Mínimo | Desvio padrão | CV |
|-------------------------|--------|--------|--------|---------------|-------|
| $\theta_{33\text{kPa}}$ | 0,2446 | 0,3152 | 0,1947 | 0,04 | 16,01 |
| DMP | 3,04 | 3,89 | 1,98 | 0,49 | 16,24 |
| PAA | 191,11 | 413,81 | 24,88 | 124,42 | 65,10 |
| K_{OS} | 71,01 | 161,14 | 0,00 | 59,58 | 83,90 |
| Macro | 0,062 | 0,121 | 0,002 | 0,03 | 56,46 |
| Micro | 0,275 | 0,350 | 0,217 | 0,05 | 16,99 |
| PT | 0,337 | 0,451 | 0,219 | 0,07 | 21,17 |
| DSi | 1,15 | 1,36 | 0,96 | 0,13 | 11,12 |
| DSf | 1,78 | 1,88 | 1,68 | 0,07 | 4,02 |
| Def | 0,74 | 0,87 | 0,52 | 0,11 | 15,59 |
| RPaj | 0,90 | 1,13 | 0,51 | 0,15 | 17,26 |
| σ_p | 40,25 | 70,60 | 18,40 | 13,96 | 34,67 |
| Cc | 0,47 | 0,78 | 0,24 | 0,14 | 29,30 |

$\theta_{33\text{kPa}}$ = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DMP = diâmetro médio ponderado de agregados (mm); PAA = permeabilidade ao ar (mm h^{-1}); K_{OS} = condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Macro = macroporosidade - poros de diâmetro maior que 0,06mm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Micro = microporosidade - poros de diâmetro menor que 0,06 mm ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT = porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DSi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial (Mg m^{-3}); DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Mg m^{-3}); Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (mm); RPaj = resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo (Busscher, 1990) (MPa); σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); Cc = índice de compressão.

Com aumento da DSi ocorreu aumento da DSf (Figura 8a) e redução da deformação do solo (Figura 8b) no teste de compressão uniaxial. O solo apresenta uma densidade máxima, que varia com a umidade, estrutura do solo e textura. Sob uma menor DSi o solo teria uma maior Def para alcançar essa densidade máxima, enquanto que um solo com uma maior DSi sua Def seria menor até alcançar essa densidade máxima. Um aumento da DSi aumenta a σ_p (Figura 8c) e reduz o Cc (Figura 8d). Uma maior DSi pode indicar que o solo sofreu pressões superiores do que uma condição de menor DSi. Nesse sentido, um solo com maior σ_p está mais próximo da densidade máxima, deformando menos quando aplicada uma pressão e, conseqüentemente, será menos suscetível à compactação. Por outro lado, se um solo apresenta uma menor DSi sua σ_p será menor e sua Def será maior, conseqüentemente, esse solo estará mais suscetível à compactação. Devido à relação significativa da DSi com σ_p e Cc, é possível

estimar a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade do solo à compactação pela DSi. Porém, o baixo coeficiente de determinação (r^2) para a σ_p indica pouca confiabilidade na equação, sendo necessário um melhor ajuste dos dados. Outros trabalhos também têm demonstrado relação da DSi com σ_p (Imhoff et al., 2001; Reinert, 1990; Alexandrou & Earl, 1998; Silva et al., 2002a).

Tabela 28 - Média, máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação (CV, %) de algumas propriedades físicas e mecânicas do solo, para o Eucalipto 4,5.

| Variável | Média | Máximo | Mínimo | Desvio padrão | CV |
|------------------|--------|--------|--------|---------------|--------|
| θ_{33kPa} | 0,2618 | 0,3133 | 0,3196 | 0,02 | 7,76 |
| DMP | 2,53 | 3,97 | 1,42 | 0,75 | 29,61 |
| PAA | 23,95 | 59,41 | 3,54 | 19,78 | 82,58 |
| $K_{\theta S}$ | 12,33 | 56,73 | 0,00 | 15,59 | 126,49 |
| Macro | 0,072 | 0,136 | 0,037 | 0,03 | 39,01 |
| Micro | 0,299 | 0,332 | 0,276 | 0,01 | 4,96 |
| PT | 0,371 | 0,422 | 0,318 | 0,03 | 7,52 |
| DSi | 1,47 | 1,64 | 1,33 | 0,09 | 6,38 |
| DSf | 1,85 | 1,93 | 1,76 | 0,05 | 2,69 |
| Def | 0,51 | 0,67 | 0,38 | 0,09 | 16,91 |
| RPaj | 0,88 | 0,99 | 0,81 | 0,04 | 4,33 |
| σ_p | 46,39 | 65,40 | 30,80 | 10,79 | 23,26 |
| Cc | 0,20 | 0,29 | 0,12 | 0,05 | 24,27 |

θ_{33kPa} = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial) ($m^3 m^{-3}$); DMP = diâmetro médio ponderado de agregados (mm); PAA = permeabilidade ao ar ($mm h^{-1}$); $K_{\theta S}$ = condutividade hidráulica do solo saturado ($mm h^{-1}$); Macro = macroporosidade - poros de diâmetro maior que 0,06mm ($m^3 m^{-3}$); Micro = microporosidade - poros de diâmetro menor que 0,06 mm ($m^3 m^{-3}$); PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$); DSi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial ($Mg m^{-3}$); DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial ($Mg m^{-3}$); Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (mm); RPaj = resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo (Busscher, 1990) (MPa); σ_p = pressão de preconsolidação (kPa); Cc = índice de compressão.

Tabela 29 – Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros físicos e mecânicos do solo.

| Variável | DSf | Def | RPaj | σ_p | Cc |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Cascalho | 0,01 ^{ns} | 0,37 ^{**} | 0,17 ^{ns} | -0,15 ^{ns} | 0,16 ^{ns} |
| Areia total | 0,55 ^{**} | -0,18 ^{ns} | -0,08 ^{ns} | 0,15 ^{ns} | -0,09 ^{ns} |
| Areia grossa | 0,48 ^{**} | -0,12 ^{ns} | -0,09 ^{ns} | 0,14 ^{ns} | -0,09 ^{ns} |
| Areia fina | 0,56 ^{**} | -0,25 ^{ns} | -0,06 ^{ns} | 0,15 ^{ns} | -0,08 ^{ns} |
| Silte | 0,04 ^{ns} | -0,42 ^{**} | -0,20 ^{ns} | -0,00 ^{ns} | -0,52 ^{**} |
| Argila | -0,47 ^{**} | 0,27 [*] | 0,13 ^{ns} | -0,12 ^{ns} | 0,24 ^{ns} |
| Silte+Argila | -0,55 ^{**} | 0,18 ^{ns} | 0,08 ^{ns} | -0,15 ^{ns} | 0,09 ^{ns} |
| θ_{33kPa} | -0,59 ^{**} | -0,31 [*] | -0,14 ^{ns} | -0,31 [*] | 0,08 ^{ns} |
| DMP | 0,00 ^{ns} | -0,23 ^{ns} | 0,09 ^{ns} | -0,04 ^{ns} | 0,07 ^{ns} |
| PAA | 0,10 ^{ns} | 0,50 ^{**} | -0,11 ^{ns} | -0,24 ^{ns} | 0,87 ^{**} |
| $K_{\theta S}$ | 0,05 ^{ns} | 0,60 ^{**} | 0,24 ^{ns} | -0,24 ^{ns} | 0,78 ^{**} |
| Macro | 0,21 ^{ns} | 0,68 ^{**} | 0,25 [*] | 0,05 ^{ns} | -0,00 ^{ns} |
| Micro | -0,78 ^{**} | -0,25 ^{ns} | 0,12 ^{ns} | 0,22 ^{ns} | -0,62 ^{**} |
| PT | -0,63 ^{**} | 0,37 ^{**} | 0,23 ^{ns} | 0,22 ^{ns} | -0,53 ^{**} |
| DSi | 0,66 ^{**} | -0,82 ^{**} | 0,27 [*] | 0,30 [*] | -0,89 ^{**} |
| DSf | - | -0,12 ^{ns} | 0,28 [*] | 0,04 ^{ns} | -0,22 ^{ns} |
| Def | -0,12 ^{ns} | - | 0,01 ^{ns} | -0,14 ^{ns} | 0,95 ^{**} |
| RPaj | 0,28 [*] | 0,01 ^{ns} | - | 0,26 [*] | -0,18 ^{ns} |

Cascalho = partículas de diâmetro entre 2 a 20 mm; Areia total = partículas de diâmetro entre 2 a 0,05 mm; Areia grossa = partículas de diâmetro entre 2 a 0,2 mm; Areia fina = partículas de diâmetro entre 0,2 a 0,05 mm; Silte = partículas de diâmetro entre 0,05 a 0,002 mm; Argila = partículas de diâmetro menor que 0,002 mm; θ_{33kPa} = umidade volumétrica na tensão de 33 kPa (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial); DMP = diâmetro médio ponderado de agregados; PAA = permeabilidade ao ar; $K_{\theta S}$ = condutividade hidráulica do solo saturado; Macro = macroporosidade - poros de diâmetro maior que 0,06mm; Micro = microporosidade - poros de diâmetro menor que 0,05 mm; PT = porosidade total; DSi = densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial; DSf = densidade do solo ao final do teste de compressão uniaxial; Def = deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial; RPaj = resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo (Busscher, 1990); σ_p = pressão de preconsolidação; Cc = índice de compressão. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

A RPaj apresentou relação positiva com a DSf (Figura 9a) e com a σ_p (Figura 9c). Novamente o r^2 foi baixo, indicando que a estimativa da σ_p pela DSi e pela RPaj tem grande potencial, necessitando de um melhor ajuste das funções. Alguns trabalhos têm apresentado relação significativa entre pressão de preconsolidação e resistência à penetração (Canarache et

al., 2000; Mosaddeghi et al., 2003; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c). Em solos revolvidos, Canarache et al. (2000), para um solo com aproximadamente 228 g kg^{-1} de argila, e Mosaddeghi et al. (2003), para um solo com 348 g kg^{-1} de argila, verificaram uma relação entre σ_p :RP (resistência à penetração) de 10:1, enquanto para uma área sob pomar de laranja Lima et al. (2006c) verificaram uma relação de 17:1 para um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com 170 g kg^{-1} de argila. Nesse estudo a relação entre σ_p :RP foi de 22:1.

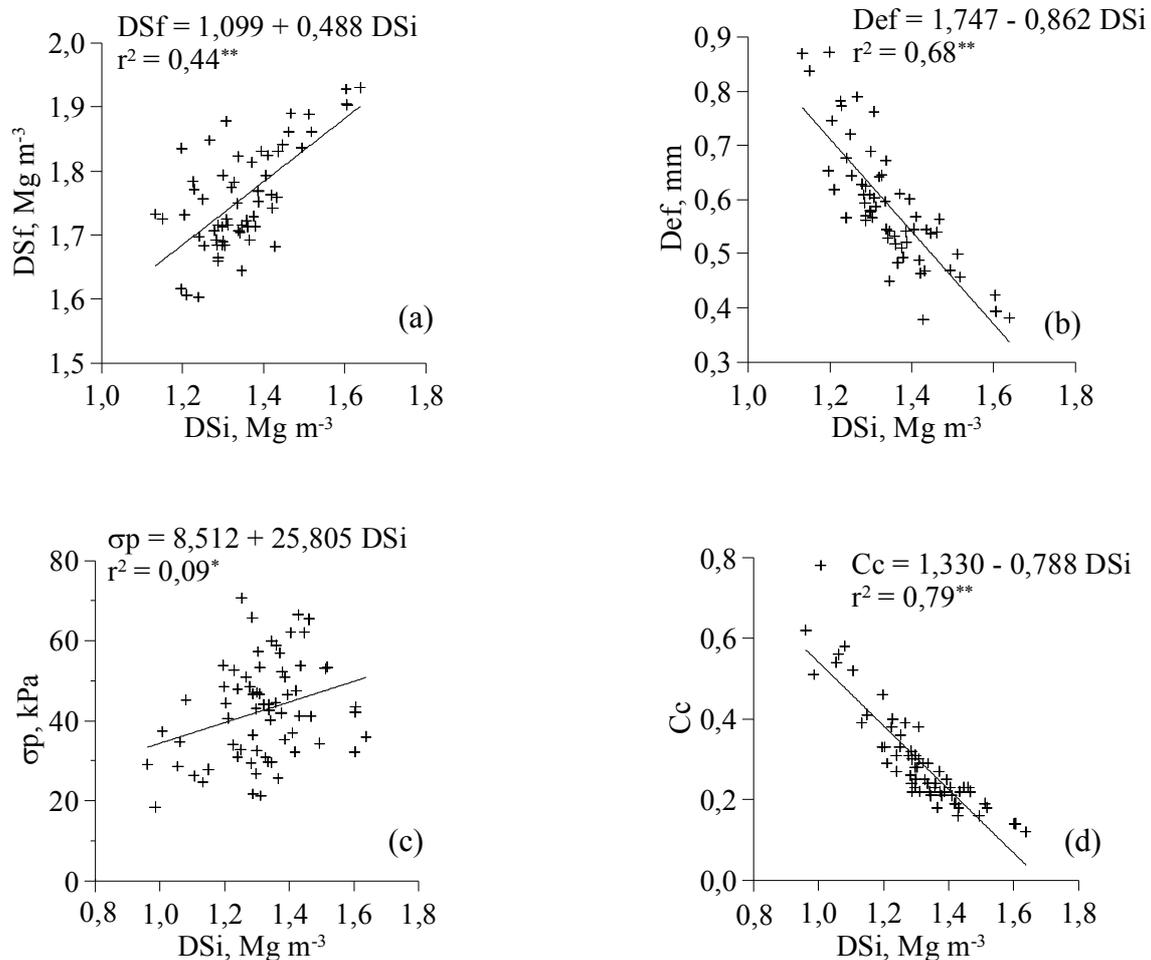


Figura 8 – Relações entre densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial (Dsi) e densidade (DSf) (a) e deformação (Def) (b) do solo ao final do teste de compressão uniaxial, pressão de preconsolidação (σ_p) (c) e índice de compressão (Cc) (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. * significativo a 5%; ** significativo a 1%.

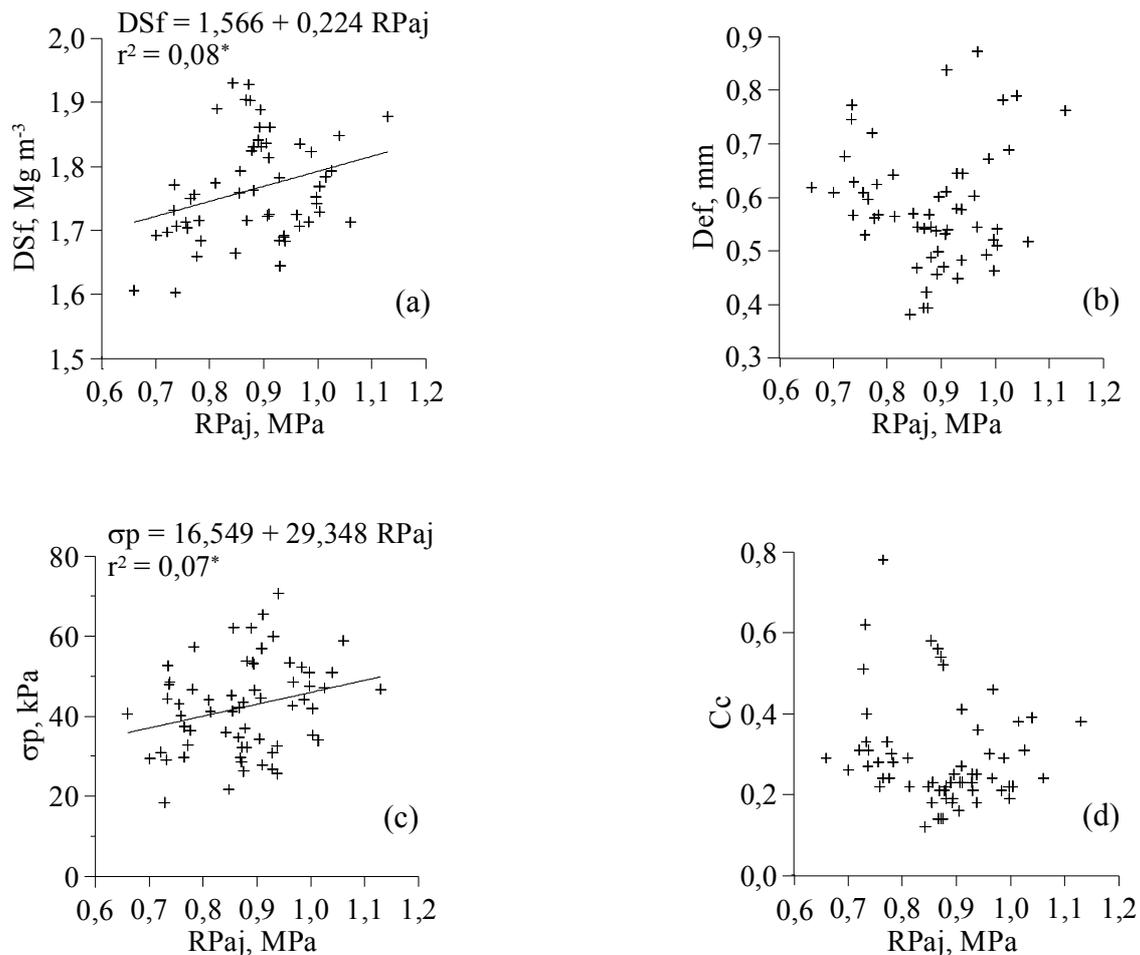


Figura 9 – Relações entre resistência do solo à penetração ajustada pelo modelo de Busscher (1990) e densidade (DSf) (a) e deformação (Def) (b) do solo ao final do teste de compressão uniaxial, pressão de preconsolidação (σ_p) (c) e índice de compressão (C_c) (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. * significativo a 5%.

Reichert et al. (2007) sugerem o uso das relações entre σ_p :DSi e σ_p :RP para obtenção de um valor ou faixa de σ_p crítico. Considerando uma resistência à penetração de 2 MPa como sendo um valor crítico para as plantas (Taylor et al., 1966), a σ_p crítica seria de 90 kPa pela relação 22:1 (σ_p :RP). Pela equação proposta por Reichert et al. (2007), que relaciona a densidade do solo quando ocorrem restrições ao crescimento radicular ou a produtividade de culturas anuais, com a argila ($DSc_{Rest} = -0,00070 \text{ argila} + 1,86045$), a densidade restritiva para esse solo, utilizando um teor médio de argila de 482 g kg^{-1} , seria de $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$, logo, a σ_p crítica pela relação entre σ_p :DSi é de 48 kPa. Portanto, valores superiores ou inferiores a 48 kPa seriam inadequados para esse solo pois, valores inferiores indicariam solo mais suscetível à compactação, enquanto que valores superiores indicariam solos muito

compactados, embora para as condições desse estudo, de modo geral, os usos apresentaram diferentes níveis de compactação mas não apresentaram diferenças significativas em seus valores de σ_p .

A Def do solo não apresentou relação com a σ_p (Figura 10a), mas apresentou relação positiva com o Cc (Figura 10b). Quanto maior a Def do solo ao final do teste de compressão uniaxial, maior sua suscetibilidade à compactação. Tentando relacionar com o que ocorre no campo, um solo sem estrutura terá maior espaço poroso para deformar quando aplicado uma pressão pelo tráfego de uma máquina ou pisoteio animal, conseqüentemente, mais suscetível à compactação esse solo será.

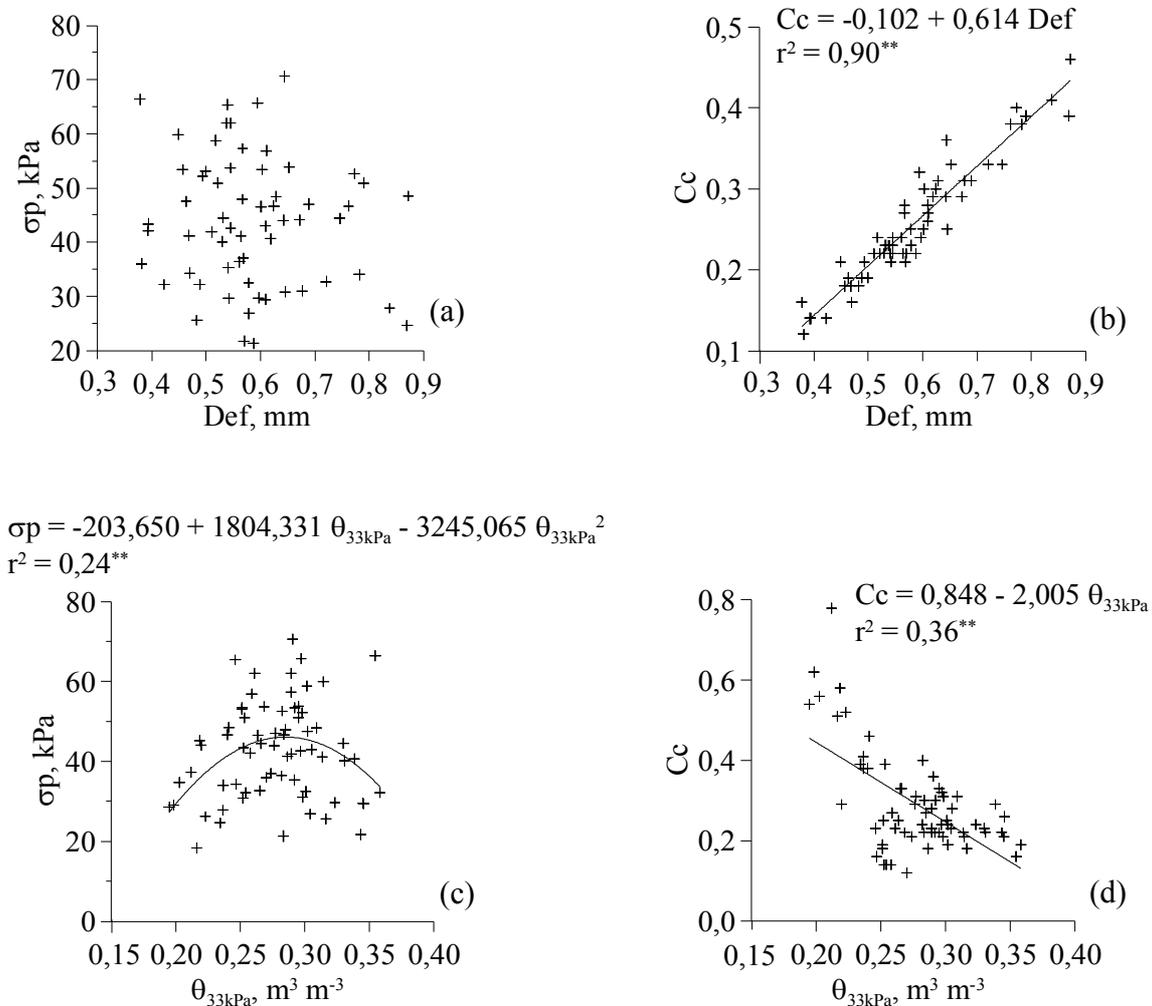


Figura 10 – Relações entre deformação do solo ao final do teste de compressão uniaxial (Def) (a, b) e umidade volumétrica na tensão de 33 kPa ($\theta_{33\text{kPa}}$) (c, d) com pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (Cc) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. ** significativo a 1%.

No entanto, após o solo sofrer pressões e consolidar, sua deformação após um tráfego ou pisoteio subsequente será menor, portanto, menor suscetibilidade à compactação. A σ_p apresentou uma relação polinomial com a $\theta_{33\text{kPa}}$, tendo na umidade de 0,25 a 0,30 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ as maiores σ_p (Figura 10c), com valores entre 46 e 47 kPa. Esses valores de σ_p estão próximos ao valor crítico de 48 kPa, obtido pela relação entre $\sigma_p:D_{si}$ ($48 \text{ kPa} = 1,52 \text{ Mg m}^{-3}$). A literatura tem apresentado relação linear (Reinert, 1990; Imhoff et al., 2001; Dias Junior et al., 2002), exponencial ou logarítmica (Dias Junior et al., 2002; Dias Junior et al., 2004; Lima et al., 2006c; Mosaddeghi et al., 2006) entre σ_p e umidade do solo. O C_c diminuiu com aumento da $\theta_{33\text{kPa}}$ (Figura 10d), embora não tenha ocorrido correlação entre esses dois parâmetros devido a grande dispersão dos dados em relação à reta.

De acordo com Dias Junior et al. (1999), embora se tenha consciência que as operações colheita florestal possam degradar o solo, não há uma metodologia capaz de quantificar que níveis de pressões podem ser aplicados aos solos em função de sua umidade para evitar a compactação adicional. Nesse sentido, são importantes as relações significativas entre a umidade e pressão de preconsolidação.

O C_c e a σ_p não apresentaram relação com a textura do solo (Figura 11). Outros estudos têm apresentado relação entre C_c e argila (Larson et al., 1980; Arvidsson, 1998; Imhoff et al., 2004). Larson et al. (1980), trabalhando com amostras de solo com estrutura alterada, e Imhoff et al. (2004), trabalhando com amostras com estrutura preservada, observaram um aumento do índice de compressão até um valor de argila de aproximadamente 330 g kg^{-1} e 300 g kg^{-1} , respectivamente. Smith et al. (1997a, b) também observaram que solos arenosos são menos compressivos que solos argilosos. Suzuki (2005) verificou que solo mais argiloso, devido à sua maior capacidade de retenção de água, necessita de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois apresenta maior suscetibilidade à compactação adicional quando cargas superiores às que o solo já sofreu são aplicadas.

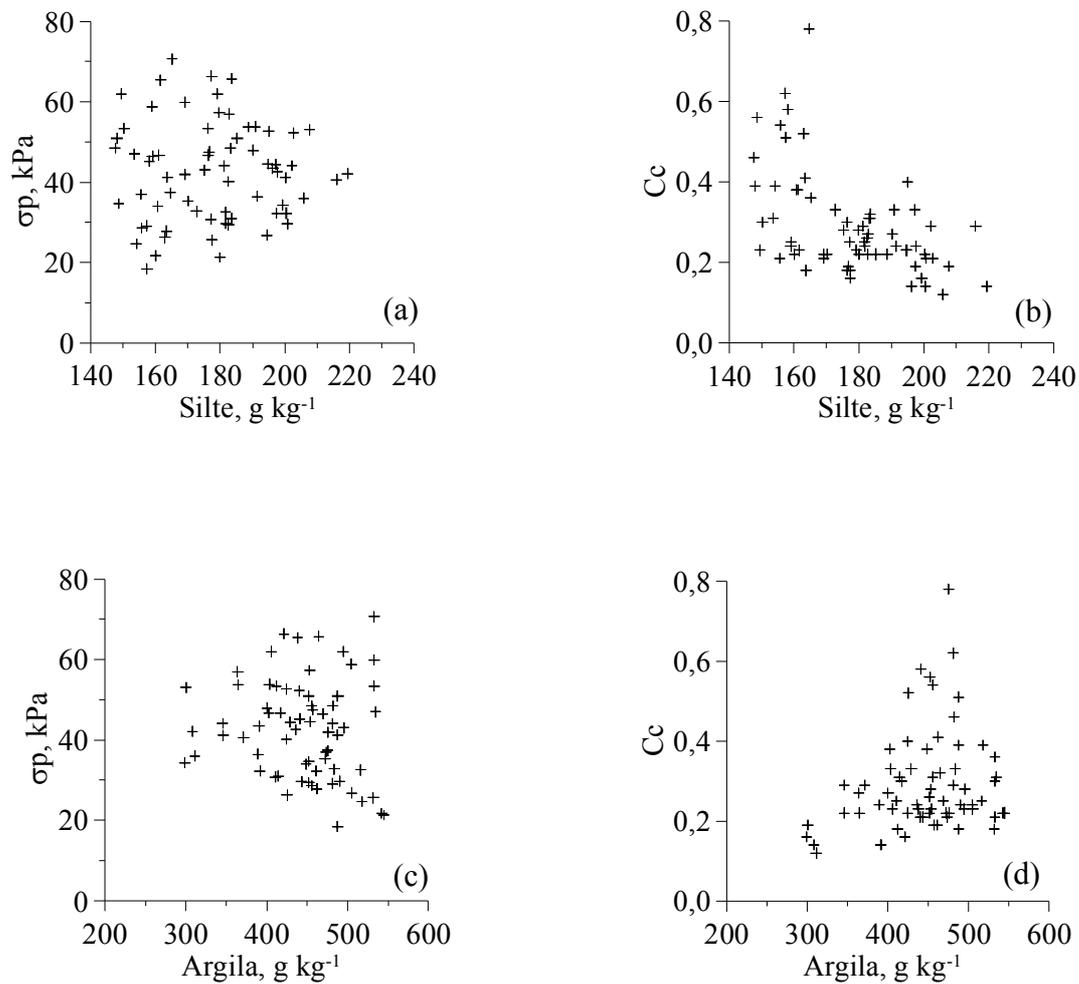


Figura 11 – Relações entre teor de silte e argila com pressão de preconsolidação (σ_p) e índice de compressão (C_c) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

** significativo a 1%.

5.4. Conclusões

A pressão de preconsolidação é baixa nos usos do Argissolo Vermelho, sendo necessários maiores cuidados com o tráfego de máquinas e pisoteio animal nessas áreas.

O solo com grau de compactação intermediário induz adequada estrutura do solo, favorável às plantas e meio ambiente. Solo com baixo nível de compactação apresenta elevada deformação e compactação ao sofrer pressões, e solo muito compactado tem o sistema poroso comprometido.

É possível estimar a suscetibilidade do solo à compactação pela densidade. A densidade do solo e a resistência do solo à penetração apresentam potencial para estimar a capacidade de suporte de carga do solo, sendo necessário melhorar as equações de ajuste.

A relação entre umidade e capacidade de suporte e suscetibilidade à compactação é significativa, sendo importante para prever os impactos causados ao solo pelo tráfego de máquinas e pisoteio animal.

5.5. Referências

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.

ALAKUKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W.C.T.; TIJINK, F.G.J.; van der LINDEN, J.P.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.

ALEXANDROU, A.; EARL, R. The relationship among the pre-compression stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.71, p.75-80, 1998.

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 & Tillage Research**, v.49, p.159-170, 1998.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineering**, v.3, p.519-524, 1990.

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

CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. **Soil & Tillage Research**,

v.56, p.185-196, 2000.

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

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1663-1674, 2006.

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

DIAS JUNIOR, M.S.; FONSECA, S.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; SILVA, A.R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.257-264, 2007.

DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.N.; ANDRADE, S.C.; AZEVEDO, M.R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, v.8, p.103-114, 2002.

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

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

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FROELICH, H.A.; MILES, D.W.R.; ROBBINS, R.W. Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.1015-1017, 1985.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.477-484, 2004.

GENRO JUNIOR, S.A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

GIASSON, E. Introdução ao estudo dos solos. In: MEURER, E.J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p.11-29.

GRIGAL, D.F. Effects of extensive forest management on soil productivity. **Forest Ecology and Management**, v.138, p.167-185, 2000.

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

HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v.116, p.77-88, 2003.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, v.73, p.89-99, 2003.

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

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, v.79, p.207-219, 2004.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.11-18, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.17-24, 2004.

INDA JUNIOR, A.V.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. Composição da fase sólida mineral do solo. In: MEURER, E.J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p.31-61.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-660.

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

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.450-457, 1980.

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

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

LIMA, C.L.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**,

v.37, p.1166-1169, 2007.

LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural**, v.36, p.1765-1772, 2006b.

LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; GUBIANI, P.I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.36, p.1172-1178, 2006a.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.945-951, 2004b.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.; LIMA, H.V.; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.409-414, 2004a.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006c.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, p.963-969, 2004.

MEURER, E.J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E.J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p.117-162.

MOSADDEGHI, M.R.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; ALEXANDROU, A. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in Central Iran. **Soil & Tillage Research**, v.70, p.53-64, 2003.

MOSADDEGHI, M.R.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; VAFAEIAN, M.; ALEXANDROU, A. Plate sinkage *versus* confined compression tests for *in situ* soil compressibility studies. **Biosystems Engineering**, v.93, p.325-334, 2006.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil & Tillage Research**, v.46, p.203-208, 1998.

PÉREZ GOMAR, E. **Qualidade física de um Vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio**. 2005. 85 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

POWERS, R.F.; SCOTT, D.A.; SANCHEZ, F.G.; VOLDSETH, R.A.; PAGE-DUMROESE, D.; ELIOFF, J.D.; STONE, D.M. The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. **Forest Ecology and Management**, v.220, p.31-50, 2005.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. de. Aspectos da

estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.929-938, 2000.

RAB, M.A. Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. **Forest Ecology and Management**, v.191, p.329 – 340, 2004.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume v. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a Typic Hapludalf**. 1990. 128 f. Thesis - Michigan State University, East Lansing, 1990.

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM

REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M. Interrelation of mechanical and physical soil properties of six south brazilian soils under no-tillage. In: ISTRO TRIENNIAL CONFERENCE, 17., 2006, Kiel, Alemanha. **Proceedings...** Kiel: ISTRO, 2006. p.1598-1602. 1 CD-ROM

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Solos, 2006. 306p.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e produtividade das culturas**. 2003. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

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

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002a.

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. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.9-15, 2002b.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira**

de Ciência do Solo, v.4, p.239-249, 2000.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil & Tillage Research**, v.41, p.53-73, 1997a.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactability and compressibility. **Soil & Tillage Research**, v.43, p.335-354, 1997b.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. **Revista STAB – açúcar, álcool e subprodutos**, v.1, p.18-23, 1983.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JUNIOR, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

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

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, v.52, p.223-232, 1999.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society of Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

6. CAPÍTULO 3

DENSIDADE REFERÊNCIA E GRAU DE COMPACTAÇÃO DE UM ARGISSOLO SOB FLORESTA E PASTAGEM

6.1. Introdução

A expressão da relação entre a densidade atual do solo em relação à densidade em algum estado referência ou de compactação máxima é denominada grau de compactação ou compactação relativa, e é expressa em porcentagem (Håkansson, 1990). Três formas de obtenção da densidade referência têm sido citadas na literatura. Uma delas é pelo teste de Proctor (Pidgeon & Soane, 1977; Carter, 1990; Silva et al., 1994; Twedorff et al., 1999), utilizando amostras com estrutura de solo não preservada. Nas outras duas metodologias obtém-se a densidade referência pelo teste de compressão uniaxial, sendo uma delas utilizando amostras com estrutura de solo não preservada e aplicando uma pressão de 200 kPa (Håkansson, 1990; Silva et al., 1997; Håkansson & Lipiec, 2000), e outra aplicando uma pressão de 1600 kPa em amostra de solo com estrutura preservada (Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007). Esses trabalhos foram realizados com culturas anuais e pastagem.

Considerando a grande importância da estrutura do solo para os processos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como para as funções ambientais, o uso de amostras com estrutura preservada para obtenção da densidade referência ganha importância. Nesse sentido, os trabalhos de Suzuki (2005) e Suzuki et al. (2007) servem como base para os estudos com o objetivo de definir uma densidade referência.

Suzuki (2005) definiu a densidade referência para áreas sob plantio direto no sul do Brasil, não sendo ainda testada para áreas de pastagem ou culturas perenes, como no caso do eucalipto.

O método para obtenção da densidade referência não deve fornecer valores elevados, resultando em baixo grau de compactação, e nem valores baixos, que significaria elevado grau de compactação. Para essas duas situações, o grau de compactação poderia ser subestimado ou superestimado. A camada de coleta das amostras para definir a densidade referência é importante, sendo necessário coletá-la na camada mais compactada para que a densidade

referência seja superior à densidade atual do solo. No caso das amostras serem coletadas em camadas menos compactadas, há possibilidade da densidade referência ser inferior à densidade da camada mais compactada, superestimando o grau de compactação.

O grau de compactação tem se mostrado útil na caracterização da compactação do solo e resposta das culturas anuais em diferentes tipos de solo (Carter, 1990; Håkansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Silva et al., 1997; Suzuki et al., 2007).

O estudo do grau de compactação em culturas anuais, tanto para solos revolvidos como não revolvidos, embora incipiente, vem sendo realizado, e tem-se constatado que o grau de compactação ótimo para as culturas, considerando a produtividade, parece estar entre 77 a 88% (Håkansson, 1990; Carter, 1990; Lipiec et al., 1991; Beutler et al., 2005; Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007).

Para culturas perenes e pastagem ainda não se tem estudos realizados com o grau de compactação, exceto por Twedorff et al. (1990) que avaliaram o grau de compactação em pastagem, obtendo a densidade referência pelo teste de Proctor.

Portanto, conhecendo-se uma metodologia para determinação do grau de compactação em culturas perenes e pastagem, esforços devem ser investidos nesses estudos, dada a viabilidade do uso do grau de compactação em culturas anuais.

Quando os solos sob condições naturais passam a ser cultivados, ocorre, na maioria das vezes, significativa degradação da estrutura do solo, sendo maior nos sistemas mais intensivos de manejo. No entanto, é possível manter as condições físicas semelhantes à condição natural se forem realizadas estratégias de manejo para manutenção da matéria orgânica pela sua freqüente adição (Alderfer & Merkle, 1941).

No Brasil existem cinco principais agentes reflorestadores: empresas produtoras de celulose, empresas siderúrgicas, empresas de produtos sólidos de madeira (como madeira serrada e chapas de madeira), governos estaduais (através de seus institutos florestais) e pequenos produtores, além de diversas outras empresas e produtores rurais que reflorestam para fins diferenciados (Bacha & Barros, 2004). Os autores estimam que, no mínimo, de 220 a 230 mil hectares serão reflorestados anualmente no período de 2003 a 2010, representando um aumento de Devido ao aumento de áreas reflorestadas e a importância desse setor na economia do país, indicadores avaliando os impactos desse sistema de manejo no solo e no meio ambiente são de grande relevância.

Este estudo objetivou definir um método para obtenção da densidade referência para solos sob floresta e pastagem, e avaliar o grau de compactação nessas áreas.

6.2. Material e métodos

A área de estudo está localizada no município de Butiá, situado na região fisiográfica Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense) do Estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 30°06'06" de latitude Sul e 51°52'18" de longitude Oeste.

Pelo sistema de Köppen o clima da região é do tipo “Cfa” – Clima Subtropical, úmido, sem estiagem. A temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C e a do mês menos quente é de 3 a 18 °C.

O solo da área foi classificado como Argissolos Vermelho distrófico (Santos et al., 2006) Tb A moderado textura média/argilosa com cascalhos relevo suave ondulado e ondulado e substrato granito.

As áreas avaliadas e suas características foram os seguintes:

a) Floresta: floresta antropizada constituída por espécies arbóreas e arbustivas com altura de aproximadamente quatro metros, utilizada como abrigo pelos bovinos. Devido à possibilidade dos bovinos conseguirem ter acesso a esse ponto de coleta nos períodos mais secos, essa área foi denominada de floresta antropizada.

b) Pastagem: pastagem com cinco anos de idade, constituída de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium sp.*). A pastagem foi instalada em uma área de 1200 ha⁻¹ sob preparo convencional no ano de 2001 (Figura 3b). Anterior ao plantio da pastagem a área foi constituída por floresta natural e em seguida foi utilizada com pastagem e soja.

c) Eucalipto 20: povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento no ano de 1986 (Figura 3c). Anterior ao plantio do eucalipto a área foi constituída por pastagem.

d) Eucalipto 4,5: plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2ª rotação, com 4,5 anos de idade. O plantio original ocorreu em 1993, com preparo do solo em faixa e escarificador de três hastes (Figura 4). A colheita do eucalipto no primeiro corte, aos 8,5 anos de idade, foi feita manualmente com motosserra e a extração da madeira realizada com Forwarder Valmet 890 com capacidade de carga de 18 Mg, sem queima do resíduo vegetal. O tráfego para colheita do eucalipto no primeiro corte foi aleatório, com número de passadas podendo chegar a 16. O segundo plantio foi feito nas entrelinhas no ano de 2002 (Figura 3d). Anterior ao plantio original ocorrido em 1993, a área foi utilizada com soja e pastagem.

O grau de compactação do solo (GC) (Håkansson, 1990) foi calculado pela seguinte equação:

$$GC = \frac{DS}{DS_{ref}} \times 100$$

Onde: DS é a densidade atual do solo e DS_{ref} é a densidade do mesmo solo em um estado de referência obtido em laboratório. O grau de compactação ou compactação relativa é expresso em porcentagem.

Para a determinação da densidade do solo (DS), no mês de setembro do ano de 2006 foram realizadas as coletas de amostras com estrutura preservada. Foram abertas três trincheiras em cada área, e em cada trincheira coletaram-se duas amostras por camada de solo, totalizando seis repetições por camada. As amostras foram coletadas em cilindros de 5,0 cm de altura e 2,5 cm de diâmetro, no centro das camadas de 0,00 - 0,05; 0,05 - 0,10; 0,10 - 0,20; 0,20 - 0,40; 0,40 - 0,60 e 0,60 - 1,00 m. Após o seu preparo, as amostras foram secadas em estufa a 105°C e a densidade do solo foi calculada pela relação da massa de solo seco em estufa a 105°C e o volume do cilindro utilizado na coleta (Blake & Hartge, 1986).

Para determinação da densidade referência do solo (DS_{ref}), amostras com estrutura preservada foram coletadas no mês de setembro do ano de 2006. Foram abertas três trincheiras em cada tratamento, e em cada trincheira coletaram-se duas amostras por camada de solo, totalizando seis repetições por camada. As amostras foram coletadas em cilindros de 2,5 cm de altura e 6,1 cm de diâmetro, e para definir a camada mais compactada as amostras foram coletadas nas camadas de 0,025 - 0,05; 0,10 - 0,125 e 0,20 - 0,225 m. As amostras foram saturadas por capilaridade e equilibradas à tensão de 33 kPa, utilizando-se câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). Em seguida, foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, no consolidômetro de modelo S-450 Terraload (Durham Geo- Interprises) com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga foi aplicada por um tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga.

Considerou-se como densidade referência do solo aquelas obtidas após a aplicação das pressões de 200 kPa (DS_{ref200 kPa}), 400 kPa (DS_{ref400 kPa}), 800 kPa (DS_{ref800 kPa}) e 1600 kPa (DS_{ref1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial.

As mesmas amostras utilizadas para determinação da densidade do solo (DS) também foram utilizadas para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório, utilizando-se um permeâmetro de carga constante (Libardi, 2005) e

macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo pelo método da mesa de tensão (EMBRAPA, 1997).

As amostras de solo utilizadas nesse capítulo foram as mesmas utilizadas no Capítulo 1.

Os resultados foram analisados por contrastes ortogonais considerando 5% de significância pelo teste de Tukey. Também foi realizada a análise regressão entre alguns parâmetros avaliados.

6.3. Resultados e discussão

Em sistema de plantio convencional para áreas agrícolas a DSref tem sido obtida pelo teste de Proctor ou pela aplicação de uma carga de 200 kPa no teste de compressão uniaxial, ambos utilizando amostras de solo com estrutura alterada. Em plantio direto de áreas agrícolas a DSref tem sido obtida pelo teste de Proctor (Dias Junior & Estanislau, 1999; Beutler et al., 2005; Santos et al., 2005) e amostra de solo com estrutura alterada, ou pela aplicação de uma carga de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial, coletando a amostra com estrutura preservada na camada de 0,08 – 0,15 m (Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007). Em sistemas de manejo sem revolvimento do solo, como no caso do plantio direto, a escolha da DSref foi baseada principalmente na camada de solo de maior compactação e a aplicação de uma pressão no teste de compressão uniaxial que resultasse em um grau de compactação intermediário, em torno de 80% (Suzuki, 2005).

Para os sistemas de manejo pastagem e eucalipto ainda não se tem estudos sobre como obter a DSref no teste de compressão uniaxial. Para obtenção da DSref nesses sistemas de manejo será utilizada a mesma estratégia de Suzuki (2005), utilizando-se amostras com estrutura preservada da camada de solo mais compactada e uma pressão no teste de compressão uniaxial que resulte em um grau de compactação intermediário.

Em todas as camadas avaliadas, a floresta e a pastagem apresentaram DS intermediária entre eucalipto 20, com menor DS, e eucalipto 4,5, com maior DS (Tabela 30), com diferenças significativas (Tabela 31), indicando que os diferentes usos compactam o solo em diferentes intensidades. Além de intensidade diferente, a profundidade de maior compactação também difere entre os usos. A maior DS situou-se na camada de 0,20 – 0,225 m na floresta e eucalipto 20, e 0,025 – 0,05 m na pastagem e eucalipto 4,5 (Tabela 30).

Tabela 30 –Valores médios das densidades obtidas antes (DS) e após a aplicação das cargas de 200 kPa (DSref_{200 kPa}), 400 kPa (DSref_{400 kPa}), 800 kPa (DSref_{800 kPa}) e 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada (m) | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | Média |
|---------------------------|----------|----------|--------------|---------------|-------|
| DS | | | | | |
| 0,025 – 0,05 | 1,28 | 1,38 | 1,03 | 1,51 | 1,31 |
| 0,10 - 0,125 | 1,25 | 1,36 | 1,19 | 1,47 | 1,33 |
| 0,20 - 0,225 | 1,30 | 1,29 | 1,23 | 1,44 | 1,31 |
| Média | 1,28 | 1,34 | 1,15 | 1,47 | |
| DSref _{200 kPa} | | | | | |
| 0,025 – 0,05 | 1,40 | 1,49 | 1,36 | 1,62 | 1,47 |
| 0,10 - 0,125 | 1,41 | 1,49 | 1,42 | 1,60 | 1,48 |
| 0,20 - 0,225 | 1,46 | 1,45 | 1,43 | 1,55 | 1,47 |
| Média | 1,42 | 1,48 | 1,40 | 1,59 | |
| DSref _{400 kPa} | | | | | |
| 0,025 – 0,05 | 1,46 | 1,56 | 1,43 | 1,69 | 1,54 |
| 0,10 - 0,125 | 1,50 | 1,56 | 1,54 | 1,67 | 1,57 |
| 0,20 - 0,225 | 1,54 | 1,47 | 1,54 | 1,61 | 1,54 |
| Média | 1,50 | 1,52 | 1,50 | 1,65 | |
| DSref _{800 kPa} | | | | | |
| 0,025 – 0,05 | 1,55 | 1,64 | 1,62 | 1,78 | 1,65 |
| 0,10 - 0,125 | 1,55 | 1,64 | 1,66 | 1,76 | 1,65 |
| 0,20 - 0,225 | 1,63 | 1,61 | 1,66 | 1,71 | 1,65 |
| Média | 1,58 | 1,63 | 1,65 | 1,75 | |
| DSref _{1600 kPa} | | | | | |
| 0,025 – 0,05 | 1,65 | 1,73 | - | 1,87 | 1,75 |
| 0,10 - 0,125 | 1,72 | 1,72 | 1,79 | 1,86 | 1,77 |
| 0,20 - 0,225 | 1,73 | 1,69 | 1,78 | 1,82 | 1,75 |
| Média | 1,70 | 1,71 | 1,78 | 1,85 | |

Tabela 31 - Contrastes ortogonais e significância para as densidades obtidas antes (DS) e após a aplicação das cargas de 200 kPa (DSref_{200 kPa}), 400 kPa (DSref_{400 kPa}), 800 kPa (DSref_{800 kPa}) e 1600 kPa (DSref_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Tratamento | DS | DSref _{200 kPa} | DSref _{400 kPa} | DSref _{800 kPa} | DSref _{1600 kPa} |
|-------------------------------|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Camada de 0,025 – 0,05 m | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | * | ** |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ** | ns | ns | ns | - |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ** | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ** | * | ns | ns | - |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | * | ** | ns | ** | ** |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ** | - |
| Camada de 0,10-0,125 m | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ** | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | * | ns | ns | ns | ns |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ns | * | ** | * | ** |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ns | ns |
| Camada de 0,20-0,225 m | | | | | |
| Floresta vs Pastagem | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | ns | ns |
| Floresta vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | ** | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 20 | ns | ns | ns | * | ** |
| Pastagem vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ** | ** | ** |
| Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 | ** | ** | ns | * | ns |

- não determinado. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

O contraste entre floresta e pastagem não foi significativo para DS, enquanto que os demais contrastes foram significativos, na camada de 0,025 – 0,05 m (Tabela 31); para as demais camadas o eucalipto 4,5 contrastou significativamente com os demais usos.

Para a densidade obtida em cada pressão aplicada, de modo geral o eucalipto 4,5 contrastou significativamente com os demais usos (Tabela 31).

As D_{sref} obtidas nas diferentes pressões no teste de compressão uniaxial foram semelhantes para a floresta, a pastagem e o eucalipto 20 nas camadas de 0,10 – 0,125 e 0,20 – 0,225 m, o que permitiria utilizar um único valor de D_{sref} para esses três usos, não sendo necessário a escolha de um valor de D_{sref} para cada uso. Contudo, resta saber se há a possibilidade de se coletar a amostra de solo na mesma camada para os diferentes usos.

Tabela 32 - Contrastes ortogonais, valor de F e significância para as densidades obtidas antes (DS) e após a aplicação das cargas de 200 kPa ($D_{sref_{200\text{ kPa}}}$), 400 kPa ($D_{sref_{400\text{ kPa}}}$), 800 kPa ($D_{sref_{800\text{ kPa}}}$) e 1600 kPa ($D_{sref_{1600\text{ kPa}}}$) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | DS | $D_{sref_{200\text{ kPa}}}$ | $D_{sref_{400\text{ kPa}}}$ | $D_{sref_{800\text{ kPa}}}$ | $D_{sref_{1600\text{ kPa}}}$ |
|---------------|----|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Floresta | | | | | |
| C1 vs C2 | * | ns | ns | ns | ns |
| C1 vs C3 | ** | ns | ns | ns | - |
| C2 vs C3 | ns | ns | ns | ns | - |
| Pastagem | | | | | |
| C1 vs C2 | ns | ns | ns | ns | ns |
| C1 vs C3 | * | ns | ns | ns | ns |
| C2 vs C3 | ns | ns | ns | ns | ns |
| Eucalipto 20 | | | | | |
| C1 vs C2 | * | ns | ns | ns | ns |
| C1 vs C3 | ** | ns | ns | ns | - |
| C2 vs C3 | ns | ns | ns | ns | - |
| Eucalipto 4,5 | | | | | |
| C1 vs C2 | ns | ns | ns | ns | ns |
| C1 vs C3 | * | ns | ns | ns | ns |
| C2 vs C3 | ns | ns | ns | ns | ns |

C1 = camada de 0,025 – 0,05 m; C2 = camada de 0,10 - 0,125; C3 = camada de 0,20- 0,225 m. ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

As camadas que apresentaram maior DS, camada de 0,20 – 0,225 m na floresta e eucalipto 20 e camada de 0,025 – 0,05 m na pastagem e eucalipto 4,5 (Tabela 30), não

contrastaram significativamente com a camada de 0,10 – 0,125 m (Tabela 32). Portanto, sugere-se coletar as amostras para determinação da DSref nessa camada para os usos floresta, pastagem e eucalipto, semelhante ao sugerido por Suzuki (2005), que recomenda a coleta na camada de 0,08 – 0,125 m em áreas sob plantio direto.

A densidade do solo obtida com o nível de compactação atual no campo e a densidade ao final do teste de compressão apresentou relação com a argila (Figura 12), fato também verificado por Reinert et al. (2006). Com incremento da argila há decréscimo da densidade. O ângulo de inclinação das equações é próximo, diferindo o intercepto, que é maior na reta da densidade do solo ao final do teste de compressão.

Devido a que ambas as densidades apresentaram relação com a argila, é aceitável a normalização dessas densidades, resultando no grau de compactação do solo. Espera-se que ao normalizar essas densidades, o grau de compactação seja independente do teor de argila do solo.

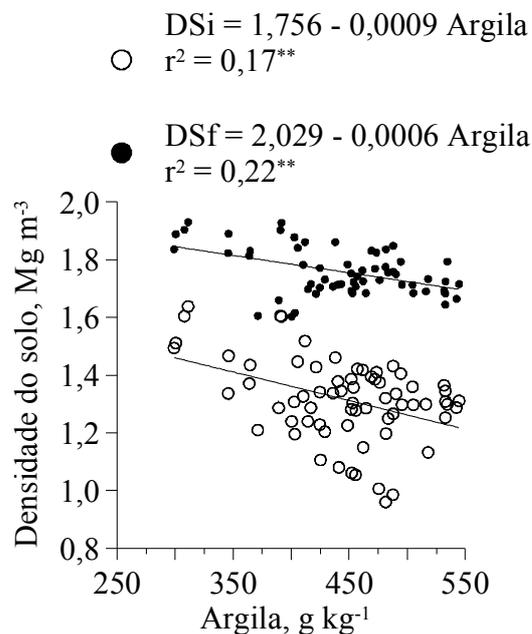


Figura 12 – Relação entre teor de argila e densidade do solo antes do teste de compressão uniaxial (DSi, Mg m⁻³) e ao final do teste de compressão uniaxial (DSf, Mg m⁻³), para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. ** significativo a 1% de significância.

Considerando todo o conjunto de dados, para todos os usos o grau de compactação calculado pela $DS_{ref200\text{ kPa}}$ e $DS_{ref400\text{ kPa}}$ alcançou valores superiores a 100%, enquanto que calculado pela $DS_{ref800\text{ kPa}}$ chegou a valores próximos a 100%, inclusive no eucalipto 20, que possui menor nível de compactação; e pela $DS_{ref1600\text{ kPa}}$ alcançou valores próximos a 90 - 95% (Figura 13).

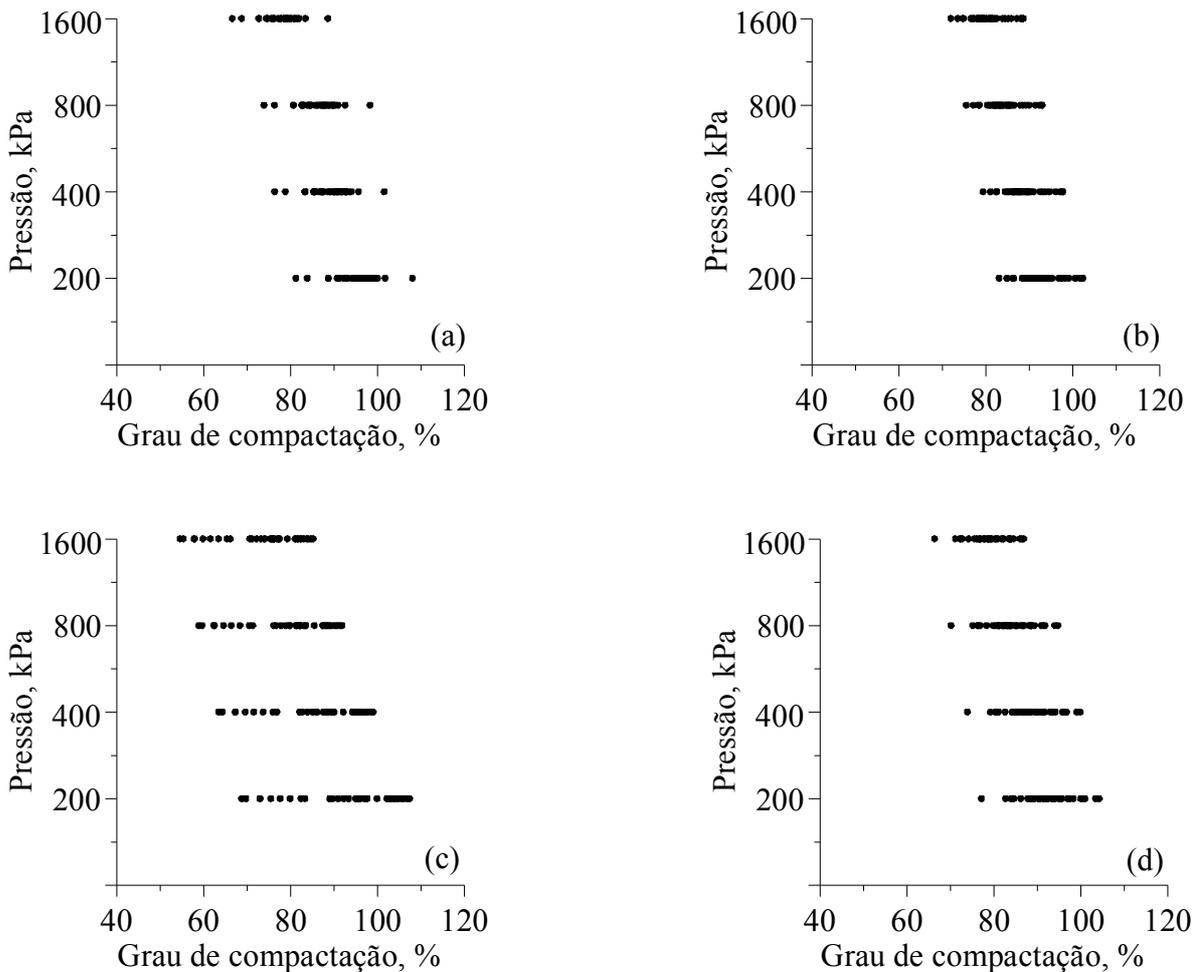


Figura 13 – Relação entre grau de compactação e pressão aplicada no teste de compressão uniaxial para a floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

Uma DS_{ref} elevada subestimaria o grau de compactação, enquanto que DS_{ref} muito baixa superestimaria o grau de compactação. Utilizando densidades obtidas com pressões inferiores a 1600 kPa superestimaria o grau de compactação, podendo, inclusive, superar 100%, o que seria inviável.

Utilizando os valores médios de grau de compactação, há redução do grau de compactação de acordo com a DS_{ref} de 200 a 1600 kPa (Tabela 33). É importante que a

escolha da DSref não resulte em um grau de compactação próximo a 100%, principalmente considerando que as máquinas estão cada vez mais pesadas e aplicando pressões mais elevadas ao solo. Sugere-se, portanto, a pressão de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial para obter a DSref.

Tabela 33 –Valores médios de grau de compactação do solo calculado pela densidade referência obtida na pressão de 200 kPa (GC_{200 kPa}), 400 kPa (GC_{400 kPa}), 800 kPa (GC_{800 kPa}) e 1600 kPa (GC_{1600 kPa}) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Tratamento | | | | |
|-------------|------------|----------|------------------------|---------------|-------|
| | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 | Média |
| | | | GC _{200 kPa} | | |
| 0,00 – 0,05 | 88,40 | 98,10 | 72,88 | 93,88 | 88,31 |
| 0,05 – 0,10 | 93,53 | 96,58 | 90,34 | 97,09 | 94,39 |
| 0,10 – 0,20 | 95,96 | 91,84 | 101,59 | 95,61 | 96,25 |
| 0,20 – 0,40 | 97,65 | 89,53 | 100,56 | 93,24 | 95,25 |
| 0,40 – 0,60 | 98,37 | 90,86 | 97,97 | 89,91 | 94,28 |
| 0,60 – 1,00 | 93,82 | 90,08 | 94,05 | 84,78 | 90,68 |
| Média | 94,62 | 92,83 | 92,90 | 92,42 | |
| | | | GC _{400 kPa} | | |
| 0,00 – 0,05 | 83,09 | 93,69 | 67,20 | 89,95 | 83,48 |
| 0,05 – 0,10 | 87,92 | 92,25 | 83,30 | 93,02 | 89,12 |
| 0,10 – 0,20 | 90,20 | 87,72 | 93,67 | 91,60 | 90,80 |
| 0,20 – 0,40 | 91,79 | 85,51 | 92,73 | 89,33 | 89,84 |
| 0,40 – 0,60 | 92,47 | 86,78 | 90,34 | 86,14 | 88,93 |
| 0,60 – 1,00 | 88,19 | 86,03 | 86,72 | 81,22 | 85,54 |
| Média | 88,94 | 88,66 | 85,66 | 88,55 | |
| | | | GC _{800 kPa} | | |
| 0,00 – 0,05 | 80,41 | 89,12 | 62,34 | 85,35 | 79,31 |
| 0,05 – 0,10 | 85,08 | 87,75 | 77,27 | 88,27 | 84,59 |
| 0,10 – 0,20 | 87,29 | 83,44 | 86,90 | 86,92 | 86,14 |
| 0,20 – 0,40 | 88,83 | 81,34 | 86,03 | 84,76 | 85,24 |
| 0,40 – 0,60 | 89,48 | 82,55 | 83,81 | 81,74 | 84,39 |
| 0,60 – 1,00 | 85,35 | 81,84 | 80,45 | 77,07 | 81,18 |
| Média | 86,07 | 84,34 | 79,47 | 84,02 | |
| | | | GC _{1600 kPa} | | |
| 0,00 – 0,05 | 72,46 | 84,98 | 57,81 | 80,76 | 74,01 |
| 0,05 – 0,10 | 76,67 | 83,67 | 71,66 | 80,65 | 77,94 |
| 0,10 – 0,20 | 78,66 | 79,56 | 80,59 | 82,25 | 80,26 |
| 0,20 – 0,40 | 80,05 | 77,56 | 79,78 | 80,21 | 79,40 |
| 0,40 – 0,60 | 80,64 | 78,71 | 77,72 | 77,34 | 78,60 |
| 0,60 – 1,00 | 76,91 | 78,03 | 74,61 | 72,93 | 75,62 |
| Média | 77,57 | 80,42 | 73,70 | 78,92 | |

O grau de compactação não relacionou com os teores de areia e argila, e apresentou relação com silte, mas com um baixo coeficiente de determinação (r^2). Uma das vantagens do grau de compactação, portanto, é sua independência da textura do solo, possibilitando a comparação dos diferentes solos, o que não seria possível com a densidade do solo já que ela é dependente da textura.

Assim como para culturas anuais o grau de compactação tem sido utilizado com êxito, esforços devem ser realizados para testá-lo em outros sistemas de manejo. Em relação à metodologia de obtenção da densidade referênciada para o estudo do grau de compactação de diferentes sistemas de manejo, pelos resultados desse estudo pode-se seguir a mesma metodologia realizada por Suzuki (2005), padronizando o método e facilitando tanto os trabalhos de campo quanto de laboratório.

De modo geral, os usos contrastaram significativamente nas camadas superficiais (0,00 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m) do solo (Tabela 34), demonstrando efeito dos sistemas de manejo nessas camadas, enquanto que nas camadas inferiores esse efeito foi menos pronunciado.

Na floresta houve contraste significativo (Tabela 35) da camada com menor grau de compactação (0,00 – 0,05 m) (Tabela 33) com as demais camadas. O menor grau de compactação na camada superior pode estar associado à concentração da matéria orgânica, atividade biológica e raízes nessa camada, enquanto que as demais camadas apresentam um grau de compactação semelhante, talvez pela mínima interferência antrópica nessa área.

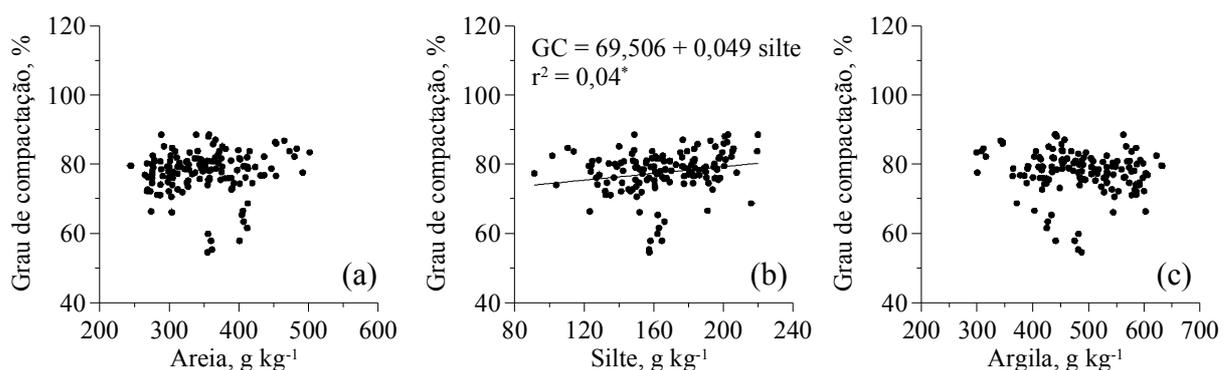


Figura 14 – Relação entre areia (a), silte (b) e argila (c) com o grau de compactação do solo calculado pela densidade referênciada de 1600 kPa ($DS_{ref1600 \text{ kPa}}$) no teste de compressão uniaxial no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. GC = grau de compactação. * significativo a 5% de significância.

Na pastagem as camadas de 0,00 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m não contrastaram significativamente entre si, mas contrastaram significativamente com as demais camadas, mostrando que o efeito no pisoteio animal se concentra nessas camadas superficiais do solo. Embora a compactação causada pelo pisoteio animal seja superficial (0,00 - 0,10 m), a taxa de infiltração de água e a lâmina de infiltração de água acumulada também são afetadas (Lanzanova, 2005). A compactação em pastagem é menos problemática de ser aliviada do que nos demais sistemas pelo fato dela se concentrar na superfície (Silva et al., 2000).

Tabela 34 - Contrastes ortogonais e significância para a variável grau de compactação do solo calculado pela densidade referência obtida na pressão de 1600 kPa ($DS_{ref1600\text{ kPa}}$) no teste de compressão uniaxial no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Contrastes | | | | | |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| | Floresta vs Pastagem | Floresta vs Eucalipto 20 | Floresta vs Eucalipto 4,5 | Pastagem vs Eucalipto 20 | Pastagem vs Eucalipto 4,5 | Eucalipto 20 vs Eucalipto 4,5 |
| | 0,00 – 0,05 | ** | ** | ** | ** | ns |
| 0,05 – 0,10 | * | ns | ns | ** | ns | ** |
| 0,10 – 0,20 | ns | ns | * | ns | ns | ns |
| 0,20 – 0,40 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,40 – 0,60 | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| 0,60 – 1,00 | ns | ns | ns | ns | * | ns |

ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

A densidade do solo antes do teste e ao final do teste de compressão mostraram-se dependentes da argila (Figura 12), mas ao normalizá-las, o grau de compactação é independente da argila (Figura 14c), o que facilita a comparação entre diferentes solos.

No eucalipto 20 houve contraste significativo entre as camadas de 0,00 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m, e dessas camadas com as demais (Tabela 32). Essas camadas superficiais apresentaram menor grau de compactação (Tabela 35), fato associado ao maior conteúdo de matéria orgânica e à concentração de raízes nessas camadas, como verificado na área de floresta.

No eucalipto 4,5 o efeito da colheita realizada na primeira rotação parece ter aumentando o grau de compactação do solo até a camada de 0,40 m.

Em uma revisão sobre compactação do solo, Reichert et al. (2007) constataram que em áreas agrícolas e pastagem a compactação ocorre até, no máximo, 0,20 m, e em áreas florestais pode atingir maiores profundidades. Afirmam ainda que, em áreas florestais, com o revolvimento do solo para plantio do novo povoamento a compactação é eliminada até a camada de ação dos implementos, porém, em áreas sob condução de rebrota, a compactação permanece.

Tabela 35 - Contrastes ortogonais e significância para a variável grau de compactação do solo calculado pela densidade referência obtida na pressão de 1600 kPa ($DS_{ref1600\text{ kPa}}$) no teste de compressão uniaxial para os usos e camadas em estudo no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Floresta | Pastagem | Eucalipto 20 | Eucalipto 4,5 |
|----------------------------|----------|----------|--------------|---------------|
| 0,00 - 0,05 vs 0,05 - 0,10 | * | ns | ** | ns |
| 0,00 - 0,05 vs 0,10 - 0,20 | ** | ** | ** | ns |
| 0,00 - 0,05 vs 0,20 - 0,40 | ** | ** | ** | ns |
| 0,00 - 0,05 vs 0,40 - 0,60 | ** | ** | ** | ns |
| 0,00 - 0,05 vs 0,60 - 1,00 | * | ** | ** | ** |
| 0,05 - 0,10 vs 0,10 - 0,20 | ns | * | ** | ns |
| 0,05 - 0,10 vs 0,20 - 0,40 | ns | ** | * | ns |
| 0,05 - 0,10 vs 0,40 - 0,60 | * | ** | * | ns |
| 0,05 - 0,10 vs 0,60 - 1,00 | ns | ** | ns | ** |
| 0,10 - 0,20 vs 0,20 - 0,40 | ns | ns | ns | ns |
| 0,10 - 0,20 vs 0,40 - 0,60 | ns | ns | ns | * |
| 0,10 - 0,20 vs 0,60 - 1,00 | ns | ns | * | ** |
| 0,20 - 0,40 vs 0,40 - 0,60 | ns | ns | ns | ns |
| 0,20 - 0,40 vs 0,60 - 1,00 | ns | ns | ns | ** |
| 0,40 - 0,60 vs 0,60 - 1,00 | ns | ns | ns | ns |

ns = não significativo; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%.

Tem-se constatado que o grau de compactação ótimo para as culturas anuais, considerando a produtividade, parece estar entre 77 a 88% (Håkansson, 1990; Carter, 1990;

Lipiec et al., 1991; Beutler et al., 2005; Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007). Nesse estudo todos os usos apresentaram valores dentro dessa faixa. A densidade do solo, como constatado no capítulo 1, parece ter sido mais sensível que o grau de compactação em captar diferenças entre os usos.

Com aumento do grau de compactação houve decréscimo linear da macroporosidade (Figura 15a) e da porosidade total (Figura 15c) e logaritmo da condutividade hidráulica do solo saturado (Figura 15d), enquanto que para a microporosidade houve um acréscimo exponencial (Figura 15b). Suzuki (2005) também verificou que um aumento do grau de compactação reduziu linearmente a macroporosidade. Uma macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ correspondeu a um grau de compactação de aproximadamente 89% para solos com 10% de argila, 80% para solos com 20-30% de argila e 75% para solos com 30 - 70% de argila (Suzuki, 2005). No horizonte Ap de dois solos com 12 e 7% de argila e 30 e 29% de silte (solos franco arenosos), numa macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o grau de compactação correspondeu a um valor de 89% (Carter, 1990).

Neste estudo, uma macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ correspondeu a um grau de compactação de 73%. Considerando um teor médio de argila de 482 g kg^{-1} , esse grau de compactação é semelhante ao verificado por Suzuki (2005) para solos com 30 – 70% de argila.

Com aumento do grau de compactação há acréscimo da microporosidade até aproximadamente 80%, havendo decréscimo para níveis superiores de compactação (Figura 15b). Através dessa observação, pode-se concluir que com aumento do grau de compactação até 80% os poros de maior diâmetro, no caso, os macroporos, vão sendo reduzidos a microporos, porém, para valores superiores a 80% os microporos também passam a ser reduzidos.

Até aproximadamente 80% de grau de compactação, que corresponde a uma macroporosidade de $0,065 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 15a), há decréscimo da condutividade hidráulica, e a partir desse valor ela passa a ser praticamente nula (Figura 15d). Esse valor de grau de compactação obtido para a condutividade parece também estar relacionada com a microporosidade, pois a partir desse valor de grau de compactação a microporosidade do solo também passa a decrescer. Mesquita & Moraes (2004) afirmam que o fluxo de água em solo saturado ocorre preferencialmente nos macroporos. Com a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (Boone & Veen, 1994). Geralmente a redução da porosidade ocorre com os poros maiores

(macroporos), responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo e que são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação (Greacen & Sands, 1980; Reichert et al., 2007).

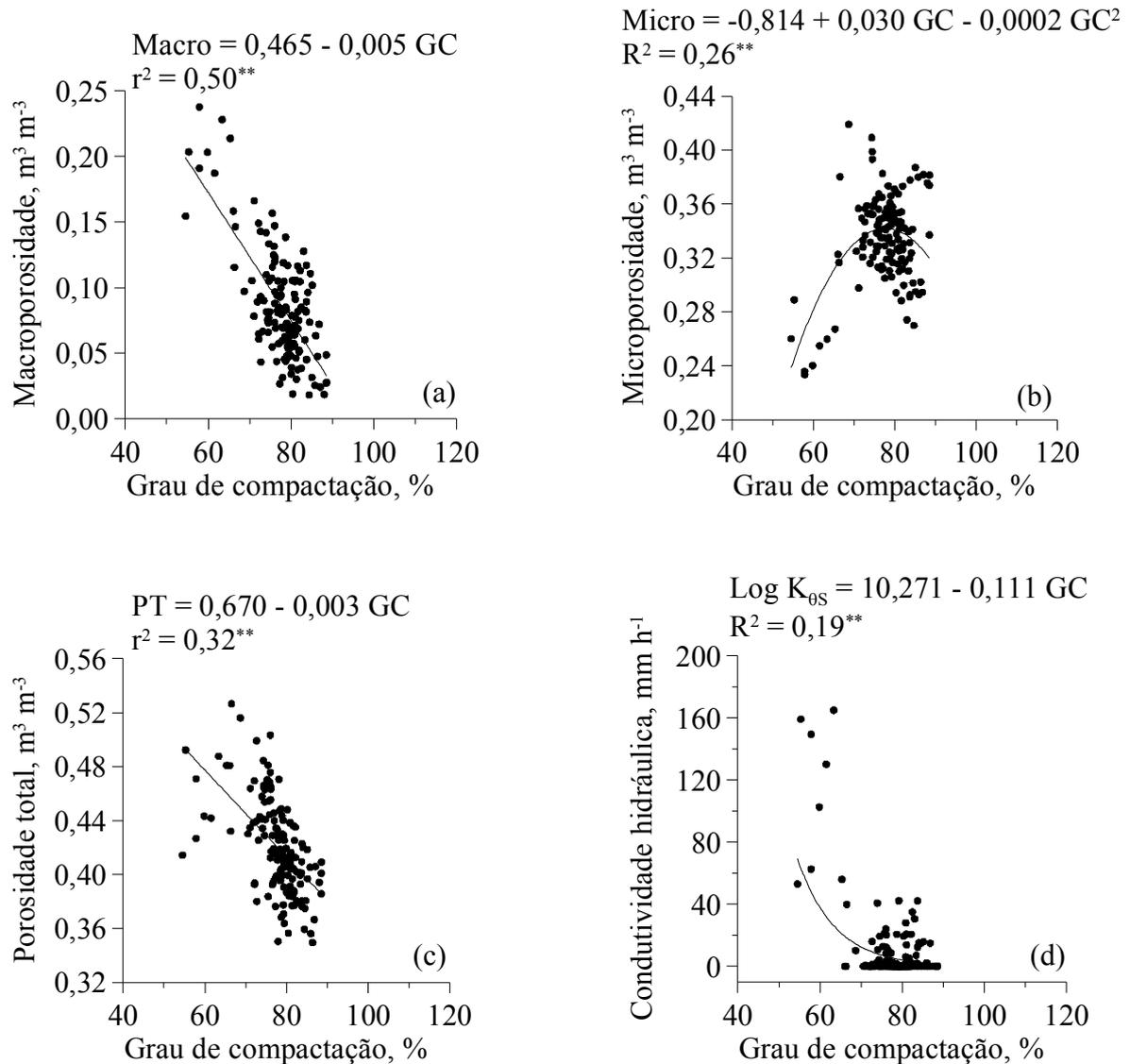


Figura 15 – Relação entre grau de compactação (GC) calculado pela densidade referência obtida na pressão de 1600 kPa ($\text{DSref}_{1600 \text{ kPa}}$) no teste de compressão uniaxial e macroporosidade (Macro) (a), microporosidade (Micro) (b), porosidade total (PT) (c) e condutividade hidráulica do solo saturado ($K_{\theta S}$) (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

Reichert et al. (2007) propõem duas formas para obtenção de um valor crítico de condutividade hidráulica do solo saturado. Em uma delas, a partir de uma macroporosidade de

$0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor considerado crítico para o crescimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968; Baver, 1949; Gupta & Allmaras, 1987), e a outra considerando um grau de compactação de 85%. Os autores obtiveram uma condutividade de $13,8 \text{ mm h}^{-1}$ a partir da macroporosidade e de $27,5 \text{ mm h}^{-1}$ pelo grau de compactação. Considerando um grau de compactação de 73% para uma macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, isso corresponderia a uma condutividade de $0,34 \text{ mm h}^{-1}$, valor inferior ao obtido pelos autores.

6.4. Conclusões

Para determinação do grau de compactação em áreas sob pastagem e floresta, as amostras devem ser coletadas com estrutura preservada na camada de 0,08 – 0,125 m e aplicada uma pressão de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial.

A densidade depende diretamente da argila e a normalização das densidades resulta em um grau de compactação que depende indiretamente da textura do solo.

Os usos afetam distintamente o grau de compactação do solo, tendo o eucalipto 20 os menores níveis de compactação, a floresta e eucalipto 4,5, níveis intermediários, e a pastagem, níveis superiores.

Grau de compactação superior a 80% reduz a microporosidade e implica em valores praticamente nulos de condutividade hidráulica do solo saturado.

6.5. Referências

ALDERFER, R.B.; MERKLE, F.G. Structural stability and permeability of native forest soils compared with cultivated areas of the same soil type. **Soil Science Society Proceedings**, v.6, p.98-103, 1941.

BACHA, C.J.C.; BARROS, A.L.M. de. Reflorestamento no Brasil: evolução recente e perspectivas para o futuro. **Scientia Florestalis**, v.66, p.191 – 203, 2004.

BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. **Soil Science**, v.68, p.1-13, 1949.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade

relativa ótima de latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.29, p.843-849, 2005.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.32, p.180-186, 1968.

GREACEN, E.L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, p.163-169, 1980.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v.6, p.65-100, 1987.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.105-120, 1990.

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J.A. A review of the usefulness of relative bulk density value in studies of soil structure and compaction. **Soil & Tillage Research**, v.53, p.71-85, 2000.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-660.

LANZANOVA, M.E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils.

Soil & Tillage Research, v.19, p.307-317, 1991.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, p.963-969, 2004.

PIDGEON, J.D.; SOANE, B.D. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. **Journal of Agriculture Science**, v.88, p.431-442, 1977.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em Ciência do Solo**, volume v. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.49-134.

REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M. Interrelation of mechanical and physical soil properties of six south brazilian soils under no-tillage. In: ISTRO TRIENNIAL CONFERENCE, 17., 2006, Kiel, Alemanha. **Proceedings...** Kiel: ISTRO, 2006b. p.1598-1602. 1 CD-ROM

SANTOS, G.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; FURLANI NETO, A.E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, p.740-752, 2005.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Solos, 2006. 306p.

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

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Managment versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.81-93, 1997.

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

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1159-1167, 2007.

TWEDORFF, D.A.; CHANASYK, D.S.; MAPFUMO, E.; NAETH, M.A.; BARON, V.S. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, v.79, p.465-471, 1999.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and

movement of soil air and water. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, v.4, p.242-246, 1961.

7. CAPÍTULO 4

EFEITO DA ESTRUTURA DO SOLO NO COMPORTAMENTO COMPRESSIVO E NA PERMEABILIDADE AO AR DE UM ARGISSOLO

7.1. Introdução

O solo forma uma camada na superfície terrestre que responde por muitos processos essenciais à vida. Ele serve como substrato para suportar o crescimento das plantas, como um reservatório de nutrientes, e como local para muitos processos biológicos envolvendo decomposição e ciclagem de compostos animais e vegetais. O solo influencia a qualidade do ar e da água através das interações com a atmosfera e como meio armazenador e purificador da água que passa pelo perfil do solo (Wienhold et al, 2004).

A qualidade do solo, do ponto de vista físico, está associada aquele solo que: a) permite a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície; b) responde ao manejo e resiste à degradação; c) permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; e d) possibilita o crescimento das raízes (Reichert et al., 2003).

Água, oxigênio, temperatura e resistência à penetração impedindo a emergência de plântulas ou crescimento radicular afetam diretamente o crescimento das plantas, enquanto a estrutura do solo, avaliada por indicadores como a densidade do solo, a textura, a agregação, a estabilidade de agregados e a distribuição do tamanho de poros, possuem relação com o rendimento de culturas através do efeito na água, aeração, temperatura e resistência a penetração (Letey, 1985).

Para que os processos físicos, químicos e biológicos do solo ocorram de modo a contribuir para a qualidade ambiental, a estrutura do solo deve permitir uma adequada aeração, infiltração e retenção de água e, trocas de gases e calor com a atmosfera. A ocorrência dos processos químicos e biológicos estará condicionada à estrutura do solo.

Operações agrícolas que envolvam mobilização e ou tráfego de máquinas alteram substancialmente a estrutura dos solos, modificando as condições que determinam o ambiente de crescimento radicular. Na maioria das vezes, há uma degradação da qualidade do solo,

cujos principais atributos indicadores parecem ser a agregação e a compactação (Reichert et al., 2003).

O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da estrutura na compressibilidade e na permeabilidade ao ar do solo.

7.2. Material e métodos

7.2.1. Descrição das áreas de estudo

A área de estudo está localizada no município de Butiá, situado na região fisiográfica Serra do Sudeste (Escudo Rio-Grandense) do Estado do Rio Grande do Sul, com coordenadas geográficas de 30°06'06" de latitude Sul e 51°52'18" de longitude Oeste.

Pelo sistema de Köppen o clima da região é do tipo “Cfa” – Clima Subtropical, úmido, sem estiagem. A temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C e a do mês menos quente é de 3 a 18 °C.

O solo da área foi classificado como Argissolos Vermelho distrófico (Santos et al., 2006) Tb A moderado textura média/argilosa com cascalhos relevo suave ondulado e ondulado e substrato granito.

As áreas avaliadas e suas características foram os seguintes:

a) Floresta: floresta antropizada constituída por espécies arbóreas e arbustivas com altura de aproximadamente quatro metros, utilizada como abrigo pelos bovinos. Devido à possibilidade dos bovinos conseguirem ter acesso a esse ponto de coleta nos períodos mais secos, essa área foi denominada de floresta antropizada.

b) Pastagem: pastagem com cinco anos de idade, constituída de braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium sp.*). A pastagem foi instalada em uma área de 1200 ha⁻¹ sob preparo convencional no ano de 2001 (Figura 3b). Anterior ao plantio da pastagem a área foi constituída por floresta natural e em seguida foi utilizada com pastagem e soja.

c) Eucalipto 20: povoamento de *Eucalyptus saligna* com vinte anos de idade, sendo realizado o preparo convencional do solo para implantação do povoamento no ano de 1986 (Figura 3c). Anterior ao plantio do eucalipto a área foi constituída por pastagem.

d) Eucalipto 4,5: plantio clonal de *Eucalyptus saligna* conduzido em 2ª rotação, com 4,5 anos de idade. O plantio original ocorreu em 1993, com preparo do solo em faixa e

escarificador de três hastes (Figura 4). A colheita do eucalipto no primeiro corte, aos 8,5 anos de idade, foi feita manualmente com motosserra e a extração da madeira realizada com Forwarder Valmet 890 com capacidade de carga de 18 Mg, sem queima do resíduo vegetal. O tráfego para colheita do eucalipto no primeiro corte foi aleatório, com número de passadas podendo chegar a 16. O segundo plantio foi feito nas entrelinhas no ano de 2002 (Figura 3d). Anterior ao plantio original ocorrido em 1993, a área foi utilizada com soja e pastagem.

7.2.2. Coleta de amostras

As amostras de solo utilizadas nesse capítulo foram as mesmas utilizadas no Capítulo 1.

No mês de setembro do ano de 2006 foram realizadas as coletas de amostras com estrutura preservada. Foram abertas três trincheiras em cada tratamento e, em cada trincheira, coletaram-se duas amostras por camada de solo, totalizando seis repetições por camada. As amostras foram coletadas em cilindros de 2,5 cm de altura e 6,1 cm de diâmetro, nas camadas de 0,025 - 0,05; 0,10 - 0,125 e 0,20 - 0,225 m.

7.2.3. Macroporosidade, microporosidade e porosidade total

As amostras com estrutura preservada foram saturadas e encaminhadas à mesa de tensão a 60 cm de coluna de água para determinação da microporosidade (EMBRAPA, 1997). A porosidade total foi calculada pela equação:

$$P_t = 1 - \frac{DS}{D_p}$$

Onde: P_t = porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); DS = densidade do solo (Mg m^{-3}); D_p = densidade de partículas (Mg m^{-3}).

A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

7.2.4. Permeabilidade ao ar

A permeabilidade do solo ao ar foi realizada com a amostra de estrutura preservada na tensão de 33 kPa, utilizando um permeâmetro de ar.

O cálculo da permeabilidade foi realizada pela equação:

$$K = \rho \times g \left(\frac{\Delta v \times L}{\Delta t \times \Delta p \times A} \right)$$

Onde: K = permeabilidade ao ar (m s^{-1}); ρ = densidade do ar no momento da medição (kg m^{-3}); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); Δv = leitura no fluxímetro (m^3); L = altura do cilindro (m); Δt = tempo (minutos); Δp = pressão de ar aplicada (hPa); A = área do cilindro (m^2).

Utilizou-se: $\rho = 1,169 \text{ kg m}^{-3}$; $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$; $\Delta t = 1$ minuto; $\Delta p = 1$ hPa;

A densidade do ar foi calculada pela equação:

$$\rho = \rho_n \left(\frac{T_n \times p}{p_n \times T} \right)$$

Onde: ρ = densidade do ar no momento da medição (kg m^{-3}); ρ_n = densidade do ar padrão (kg m^{-3}); T_n = temperatura padrão ($^{\circ}\text{K}$); p = pressão atmosférica na medição (mbar); p_n = pressão atmosférica padrão (mbar); T = temperatura na medição ($^{\circ}\text{K}$).

Utilizou-se: ρ_n (pressão atmosférica de 1013 mbar e temperatura de $273,15 \text{ }^{\circ}\text{K}$) = $1,293 \text{ kg m}^{-3}$; T_n ($0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) = $273,15 \text{ }^{\circ}\text{K}$; $p = 1000$ mbar; $p_n = 1013$ mbar; T ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) = $298,15 \text{ }^{\circ}\text{K}$.

7.2.5. Compressibilidade

As amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade e em seguida equilibradas à tensão de 33 kPa, utilizando-se câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). Em seguida, foram submetidas ao teste de compressão uniaxial, com aplicação de cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, no consolidômetro de modelo S-450 Terraload (Durham Geo- Interprises) com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga foi aplicada por um tempo de 5 minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga.

Calculou-se o grau de saturação (G_{Si}) e a densidade do solo (D_{Si}) antes do teste de compressão. Com base no deslocamento vertical medido em laboratório no consolidômetro após a aplicação de cada carga, foi calculada a deformação do solo ao final do teste (Def). O índice de compressão (C_c) e a pressão de preconsolidação (σ_p) foram calculados pelo método de Casagrande (Casagrande, 1936) com ajuste manual dos dados no programa computacional Compress (Reinert et al., 2003).

Foram plotadas as curvas de compressão do solo relacionando a densidade do solo observada com a pressão aplicada no teste de compressão uniaxial.

7.2.6. Grau de compactação

O grau de compactação do solo (GC) (Håkansson, 1990) foi calculado pela seguinte equação:

$$GC = \frac{DS}{DS_{ref}} \times 100$$

Onde: DS é a densidade atual do solo e DSref é a densidade do mesmo solo em um estado de referência obtido em laboratório. O grau de compactação ou compactação relativa é expresso em porcentagem.

Considerou-se como DSref aquela obtida ao final do teste de compressão uniaxial, sendo as amostras de solo da camada de 0,10 – 0,125 m, conforme recomendado no capítulo 3.

7.2.7. Densidade de partículas

A densidade de partículas foi realizada com amostras de estrutura alterada coletadas no mês de setembro do ano de 2006. A coleta de amostras com estrutura alterada foi realizada em três trincheiras dentro de cada área do tratamento, nas camadas de 0,00 – 0,05; 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m. A densidade de partículas foi realizada pelo método proposto por Gubiani et al. (2006).

7.2.8. Estrutura alterada

Após realizadas as determinações de macroporosidade, microporosidade, porosidade total, permeabilidade ao ar e compressibilidade com as amostras com estrutura preservada, as amostras de cada cilindro foram desestruturadas de modo que as partículas passassem em peneira de malha de 2 mm, em seguida os cilindros foram preenchidos com seu respectivo solo, sofrendo uma leve compactação para que todo o solo preenchesse o cilindro (Figura 16). As amostras foram saturadas e realizou-se as determinações de macroporosidade, microporosidade, porosidade total, e permeabilidade ao ar e compressibilidade com as amostras equilibradas na tensão de 33 kPa. Ao final dessas avaliações as amostras foram encaminhadas à estufa para determinação da densidade do solo.

7.2.9. Delineamento experimental e análise estatística

Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, comparando para cada camada e tratamento as amostras com estrutura preservada e alterada. Realizou-se a análise de variância e o teste de médias por Tukey considerando 5% de significância. Também foi realizada a análise de regressão considerando os parâmetros avaliados.

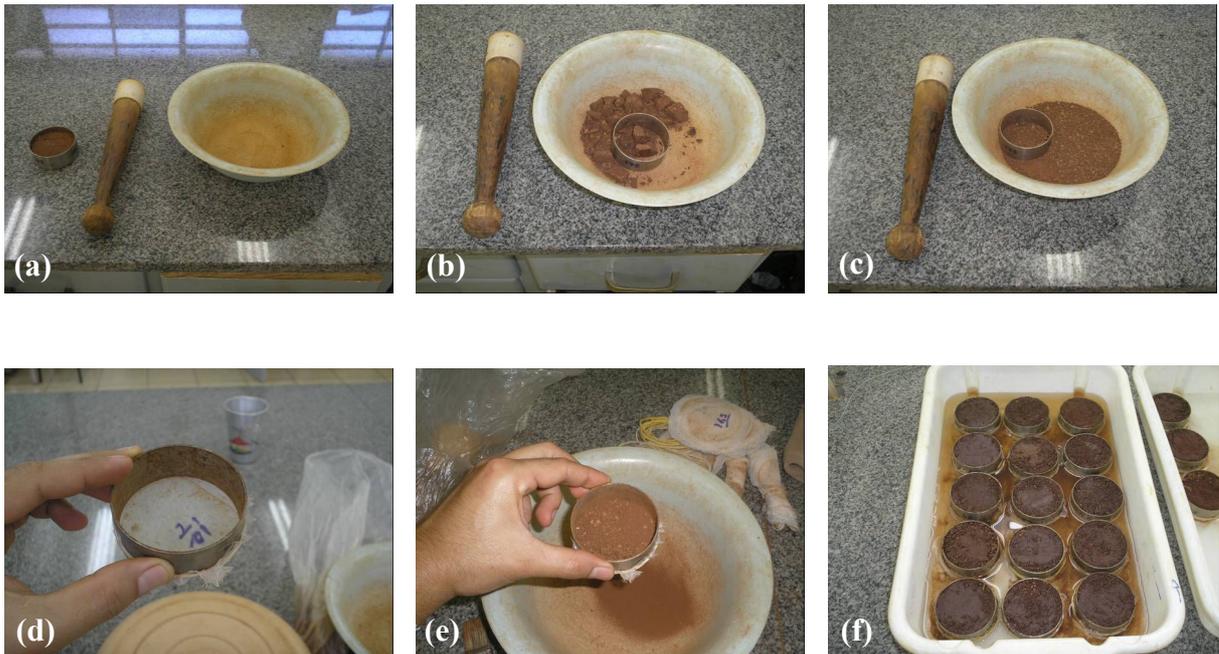


Figura 16 – Algumas etapas do preparo das amostras com estrutura alterada: amostra com estrutura preservada após ser retirada da estufa (a); retirada da amostra do cilindro (b); amostra com estrutura alterada peneirada em peneira de abertura de 2 mm (c); preparo do cilindro para receber a amostra com estrutura alterada (d); montagem do cilindro com amostra de estrutura alterada (e); saturação com água das amostras com estrutura alterada (f).

7.3. Resultados e discussão

A porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total) do solo foram pouco influenciadas pela estrutura do solo (Tabela 36). Principalmente a microporosidade foi influenciada pelo tipo de estrutura do solo, havendo um incremento dessa na amostra com estrutura alterada. Considerando que a massa de solo e o volume do cilindro eram os mesmos para ambos os tipos de estrutura, a densidade e a porosidade total devem ser semelhantes para ambos os tipos de estrutura, alterando apenas a relação entre macroporosidade e microporosidade.

Tabela 36 – Valores médios de macroporosidade, microporosidade e porosidade total considerando amostra de solo com estrutura preservada e alterada para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Macroporosidade | | Microporosidade | | Porosidade total | |
|---------------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | m ³ m ⁻³ | | m ³ m ⁻³ | | m ³ m ⁻³ | |
| | Preservada | Alterada | Preservada | Alterada | Preservada | Alterada |
| Floresta | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,109 a | 0,149 a | 0,367 a | 0,337 b | 0,475 a | 0,486 a |
| 0,10-0,125 | 0,159 a | 0,183 a | 0,347 a | 0,335 a | 0,506 a | 0,518 a |
| 0,20-0,225 | 0,150 a | 0,146 a | 0,336 a | 0,348 a | 0,486 a | 0,495 a |
| Pastagem | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,093 a | 0,094 a | 0,356 a | 0,370 a | 0,449 a | 0,463 a |
| 0,10-0,125 | 0,105 a | 0,107 a | 0,358 a | 0,366 a | 0,463 a | 0,473 a |
| 0,20-0,225 | 0,140 a | 0,126 a | 0,342 a | 0,363 a | 0,482 a | 0,489 a |
| Eucalipto 20 | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,354 a | 0,333 a | 0,237 b | 0,258 a | 0,591 a | 0,591 a |
| 0,10-0,125 | 0,226 a | 0,204 a | 0,287 a | 0,315 a | 0,513 a | 0,519 a |
| 0,20-0,225 | 0,205 a | 0,196 a | 0,303 a | 0,319 a | 0,508 a | 0,515 a |
| Eucalipto 4,5 | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 0,082 a | 0,068 a | 0,299 b | 0,339 a | 0,381 a | 0,407 a |
| 0,10-0,125 | 0,127 a | 0,099 a | 0,286 b | 0,330 a | 0,413 a | 0,429 a |
| 0,20-0,225 | 0,120 a | 0,085 b | 0,311 b | 0,355 a | 0,432 a | 0,440 a |

Médias seguidas de letras iguais na linha, para cada propriedade física, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A permeabilidade ao ar não diferiu estatisticamente entre os tipos de estrutura (Tabela 37). A permeabilidade ao ar e água ocorre principalmente nos macroporos, portanto, esperava-se uma permeabilidade semelhante entre os tipos de estrutura por não ter ocorrido diferenças na macroporosidade. Contudo, nas amostras com estrutura preservada há maior continuidade de poros devido à atividade biológica e decomposição de raízes, enquanto nas amostras com estrutura alterada há possibilidade de ter ocorrido poros menos contínuos devido a desestruturação do solo para acomodá-lo no cilindro. Mesmo possuindo porosidade total inferior que no preparo convencional, o plantio direto de áreas agrícolas

geralmente conduz água mais eficientemente (Wu et al., 1992), devido os poros biológicos ou bioporosidade (Costa et al., 2003). Mando et al. (1996) constataram a eficiência de poros biológicos no aumento da infiltração de água. Durante a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, diminuem e são substituídos por poros menores, principalmente poros que retêm água. Esse decréscimo da porosidade de aeração pode ser 1,5-2 vezes maior que o decréscimo no espaço poroso total, no entanto, a diminuição do coeficiente de difusão do oxigênio vai depender da geometria e estabilidade dos canais de poros de aeração e do grau de deformação durante a compactação (Boone & Veen, 1994).

Tabela 37 – Valores médios de permeabilidade ao ar, grau de saturação inicial e deformação do solo considerando amostra de solo com estrutura preservada e alterada para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Permeabilidade, mm h ⁻¹ | | Grau de saturação, % | | Deformação, mm | |
|---------------|------------------------------------|----------|----------------------|----------|-----------------|----------|
| | Preservada | Alterada | Preservada | Alterada | Preservada | Alterada |
| Floresta | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 17,29 a | 27,71 a | 66,52 a | 52,71 b | 0,551 b | 0,759 a |
| 0,10-0,125 | 34,55 a | 30,69 a | 57,07 a | 50,37 b | 0,673 b | 0,792 a |
| 0,20-0,225 | 19,03 a | 19,78 a | 61,73 a | 54,04 b | 0,624 b | 0,783 a |
| Pastagem | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 26,09 a | 10,07 a | 69,62 a | 64,21 a | 0,513 b | 0,744 a |
| 0,10-0,125 | 15,09 a | 10,21 a | 67,39 a | 62,34 a | 0,538 b | 0,728 a |
| 0,20-0,225 | 16,10 a | 14,75 a | 61,94 a | 60,04 a | 0,593 a | 0,711 a |
| Eucalipto 20 | | | | | | |
| 0,025-0,05 | Não determinado | | 36,65 a | 33,92 a | Não determinado | |
| 0,10-0,125 | 192,70 a | 110,99 a | 45,87 a | 47,98 a | 0,639 a | 0,756 a |
| 0,20-0,225 | 66,33 a | 119,39 a | 50,33 a | 47,42 a | 0,769 a | 0,702 a |
| Eucalipto 4,5 | | | | | | |
| 0,025-0,05 | 19,16 a | 7,37 a | 68,45 a | 67,83 a | 0,483 b | 0,650 a |
| 0,10-0,125 | 27,53 a | 17,18 a | 63,23 a | 59,95 a | 0,539 a | 0,656 a |
| 0,20-0,225 | 26,35 a | 9,67 a | 62,02 a | 61,27 a | 0,530 b | 0,695 a |

Médias seguidas de letras iguais na linha, para cada propriedade física, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

O grau de saturação diferiu entre os tipos de estrutura somente na floresta e as amostras com estrutura alterada apresentaram maior deformação (Tabela 37). No processo de deformação do solo, os poros de maior diâmetro são os primeiros a serem comprimidos e deformados, até que o solo alcance seu limite de deformação, que vai depender da estrutura, textura e umidade do solo. Curi et al. (1993) definem compactação como sendo uma diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, causando um rearranjo mais denso das partículas do solo e conseqüente redução da porosidade. As amostras com estrutura alterada apresentaram maior microporosidade, poros menos contínuos e frágeis, portanto, maior possibilidade de deformação do solo e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à compactação.

Tabela 38 – Valores médios de pressão de preconsolidação e índice de compressão considerando amostra de solo com estrutura preservada e alterada para os usos e camadas no Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

| Camada, m | Pressão de preconsolidação, kPa | | Índice de compressão | |
|---------------|---------------------------------|----------|----------------------|----------|
| | Preservada | Alterada | Preservada | Alterada |
| Floresta | | | | |
| 0,025-0,05 | 47,53 a | 49,85 a | 0,25 b | 0,39 a |
| 0,10-0,125 | 48,10 a | 49,85 a | 0,33 a | 0,38 a |
| 0,20-0,225 | 39,35 b | 51,92 a | 0,28 b | 0,40 a |
| Pastagem | | | | |
| 0,025-0,05 | 44,56 a | 38,47 a | 0,21 b | 0,34 a |
| 0,10-0,125 | 35,53 a | 35,50 a | 0,22 b | 0,32 a |
| 0,20-0,225 | 34,42 a | 40,76 a | 0,25 a | 0,33 a |
| Eucalipto 20 | | | | |
| 0,025-0,05 | 31,24 a | 35,85 a | 0,60 a | 0,58 a |
| 0,10-0,125 | 42,20 a | 54,40 a | 0,43 a | 0,45 a |
| 0,20-0,225 | 46,47 a | 46,62 a | 0,38 a | 0,45 a |
| Eucalipto 4,5 | | | | |
| 0,025-0,05 | 46,00 a | 38,65 a | 0,18 a | 0,25 a |
| 0,10-0,125 | 42,27 a | 34,85 a | 0,21 a | 0,28 a |
| 0,20-0,225 | 50,92 a | 39,33 a | 0,21 b | 0,29 a |

Médias seguidas de letras iguais na linha, para cada propriedade física, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A pressão de preconsolidação não diferiu entre os tipos de estrutura (Tabela 38). A única pressão que as amostras com estrutura alterada possam ter recebido foi no preparo das amostras, embora essa pressão tenha sido muito pequena. As amostras com estrutura preservada apresentaram valores de pressão de preconsolidação muito baixos, pois estudos têm apresentado valores mais elevados do que os obtidos nas áreas de eucalipto e pastagem (Kondo & Dias Junior, 1999; Lima et al., 2004), embora Pérez Gomar (2005) tenha verificado resultados semelhantes em pastagem. Esses baixos valores de pressão de preconsolidação, mesmo em áreas sob pastejo e colheita florestal podem estar associados à mineralogia desse solo e à textura.

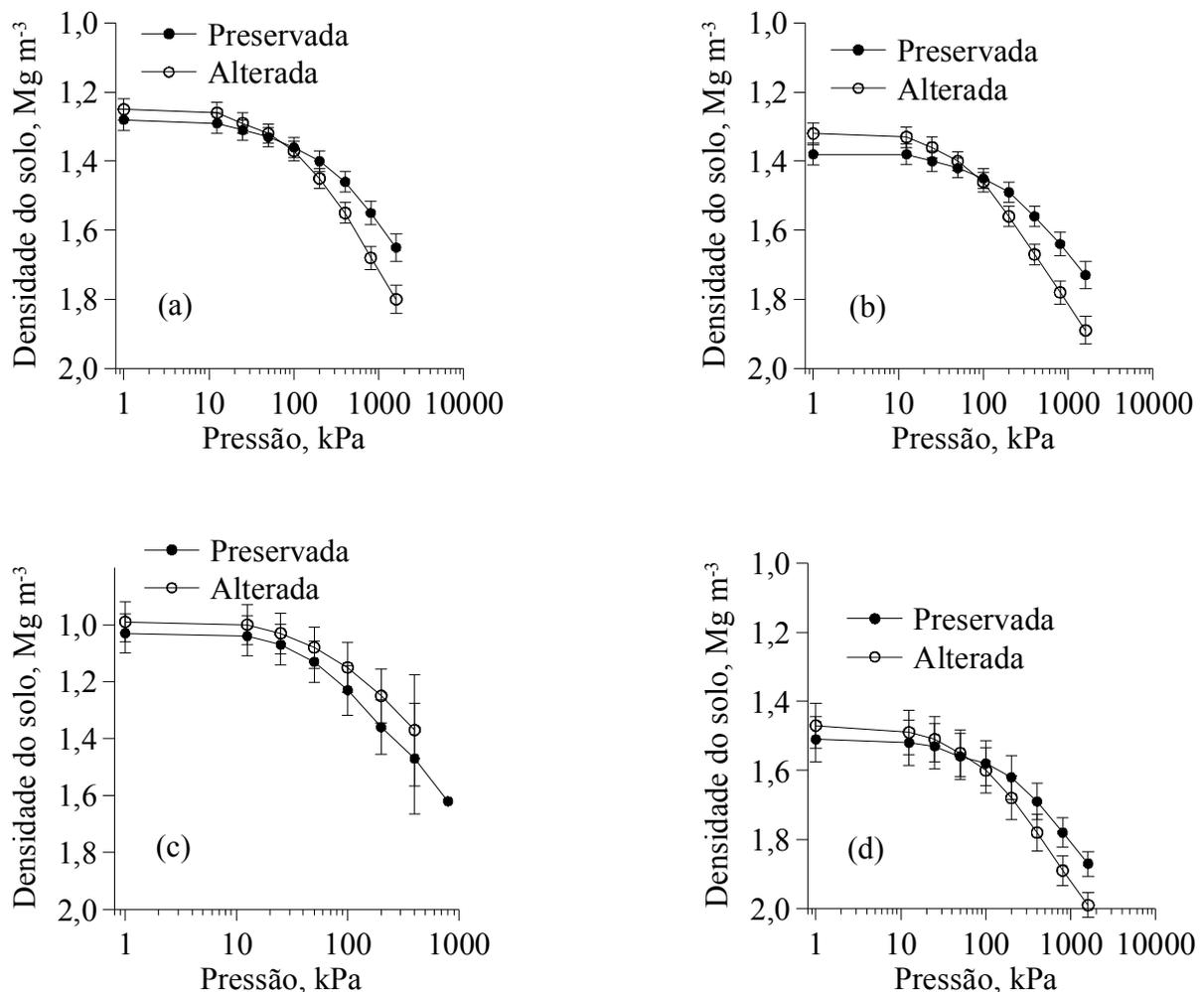


Figura 17 – Curva de compressão do solo para amostras com estrutura do solo preservada e alterada para a camada de 0,025 a 0,05 m e para os usos floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

As amostras com estrutura alterada apresentaram maior C_c , sendo mais suscetíveis à compactação. Comparando as curvas entre C_c e argila dos trabalhos de Imhoff et al. (2004), que trabalharam com amostras com estrutura preservada, e Larson et al. (1980), utilizando amostras com estrutura alterada, verifica-se que amostras com estrutura alterada são mais suscetíveis à compactação.

A densidade inicial do solo (antes da amostra ser submetida ao teste de compressão uniaxial) não diferiu entre os tipos de estrutura do solo, em nenhuma das camadas avaliadas (Figuras 17, 18 e 19). Essa semelhança da densidade entre os tipos de estrutura é relacionada ao fato da massa de solo utilizada em ambas as estruturas ter sido a mesma, apenas o sistema poroso (macroporosidade e microporosidade) foi modificado.

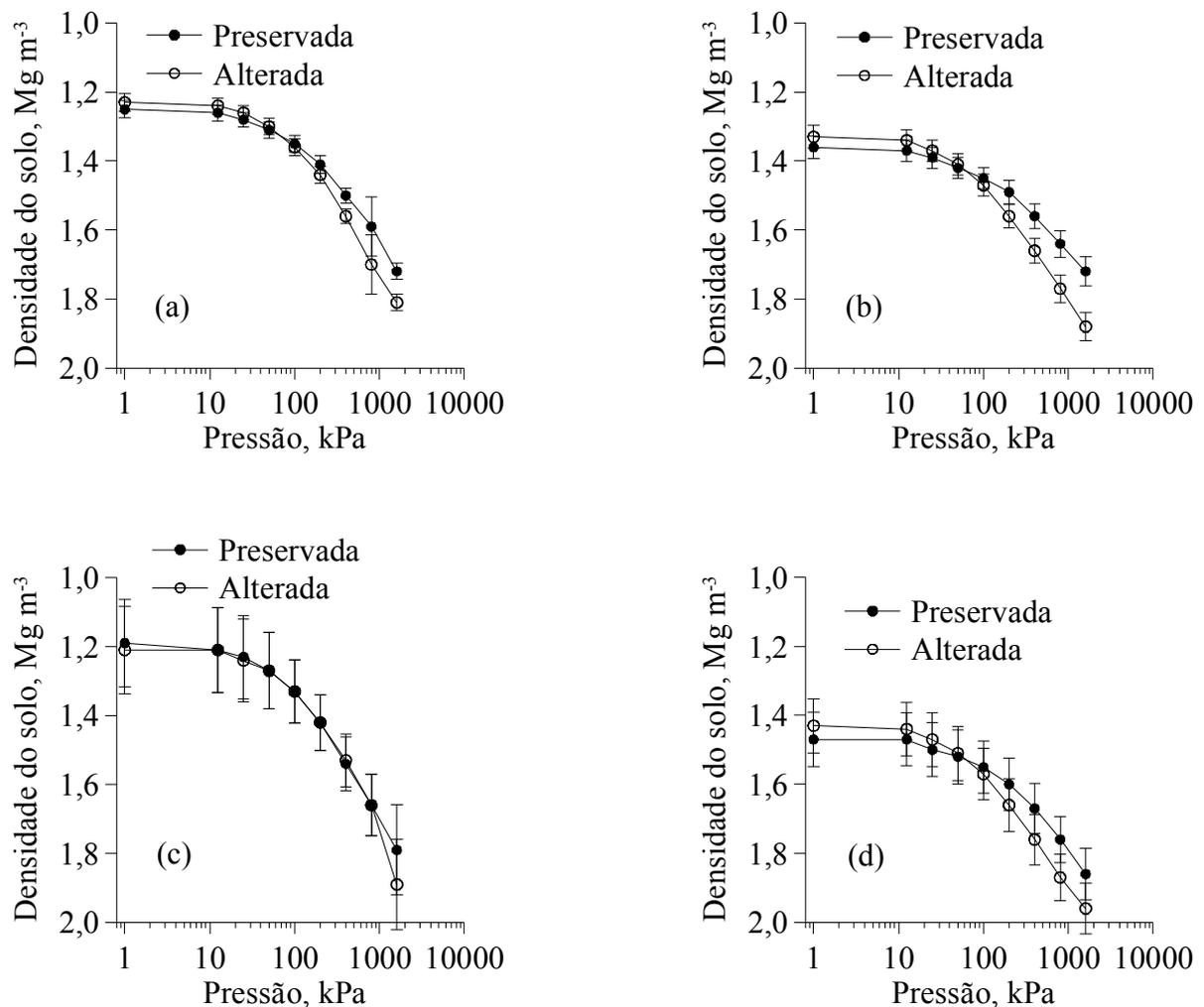


Figura 18 – Curva de compressão do solo para amostras com estrutura do solo preservada e alterada para a camada de 0,10 a 0,125 m e para os usos floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

Embora a densidade inicial do solo não tenha diferido, as curvas de compressão das amostras com estrutura alterada deslocaram-se para densidade mais elevadas do que as amostras com estrutura preservada, terminando com densidades mais elevadas ao final do teste de compressão uniaxial, exceto no eucalipto 20 na camada de 0,025 a 0,05 m (Figuras 17, 18 e 19).

As diferenças estatísticas que ocorreram entre as curvas de compressão com estrutura preservada e alterada foram nas pressões maiores que 200 kPa.

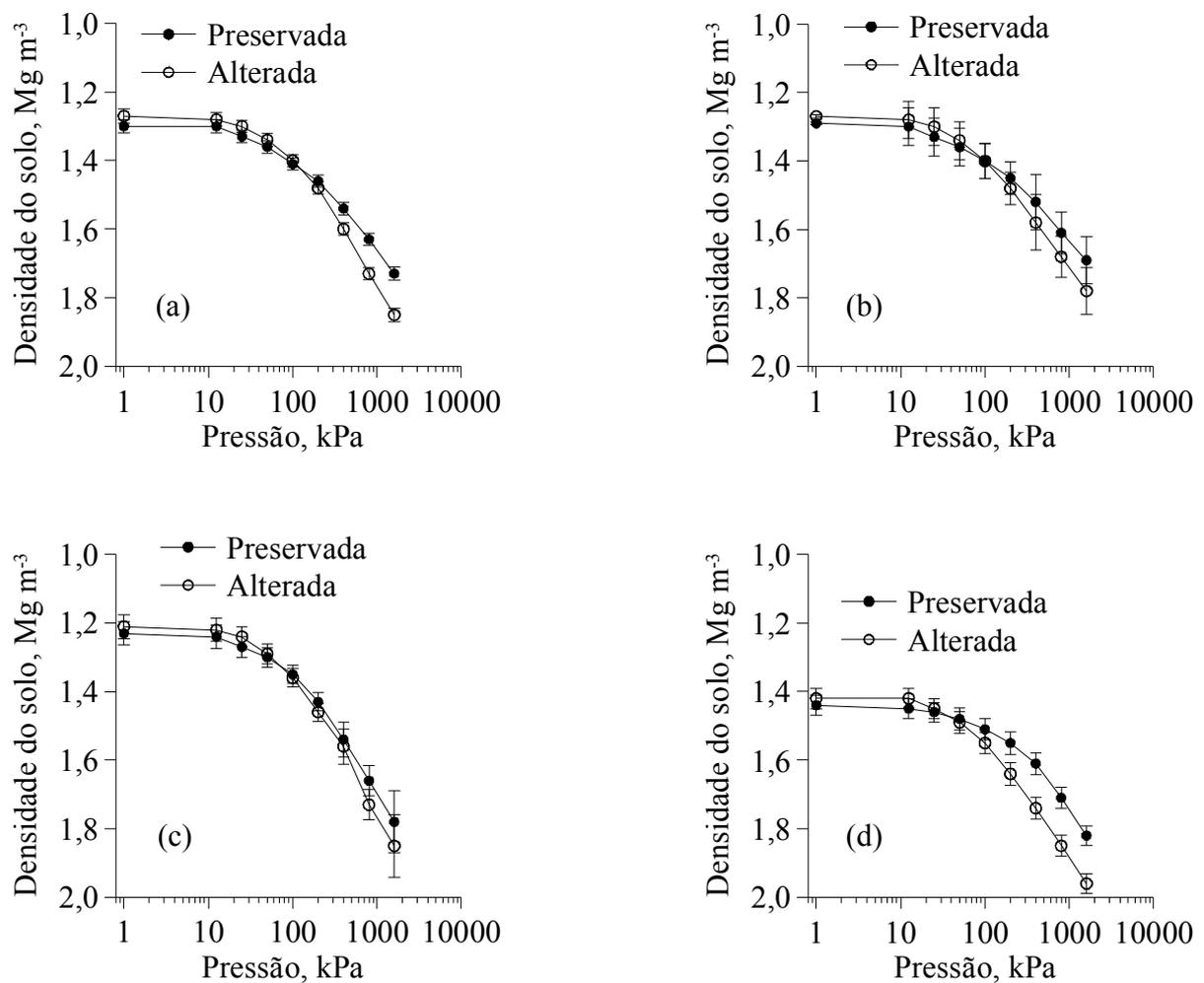


Figura 19 – Curva de compressão do solo para amostras com estrutura do solo preservada e alterada para a camada de 0,20 a 0,225 m e para os usos floresta (a), pastagem (b), eucalipto 20 (c) e eucalipto 4,5 (d) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

A PAA não foi relacionada com a textura do solo (Figura 20). Esperava-se relação da PAA com areia e argila, pois, geralmente, em uma condição natural, solos arenosos possuem mais poros de maior diâmetro e, portanto, maior permeabilidade, enquanto solos argilosos possuem poros de menor diâmetro, dificultando a permeabilidade. No entanto, o manejo pode alterar essas relações, como parece ter ocorrido neste estudo.

A PAA apresentou relação exponencial com a DSi e as curvas das amostras com estrutura preservada e alterada foram semelhantes (Figura 21a). Até aproximadamente $DSi = 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, houve um decréscimo da PAA, sendo praticamente constante a partir dessa DSi. Horn et al. (2004) verificaram que solos com baixa densidade geralmente apresentam elevada permeabilidade ao ar. Considerando a equação proposta por Reinert et al. (2006), que relaciona a densidade do solo quando o intervalo hídrico ótimo é igual a zero e a argila, a densidade crítica para esse solo é de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, utilizando um teor médio de argila de 482 g kg^{-1} , portanto, parece aceitável decréscimo da PAA até a $DSi = 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$.

Houve relação exponencial entre a PAA e a macroporosidade apenas para amostras com estrutura alterada (Figura 21b). A partir de uma macroporosidade de aproximadamente $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ houve incremento da PAA. Vomocil & Flocker (1961), Grable & Siemer, (1968), Baver (1949) e Gupta & Allmaras (1987) consideram um mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporosidade para o adequado crescimento e desenvolvimento das plantas.

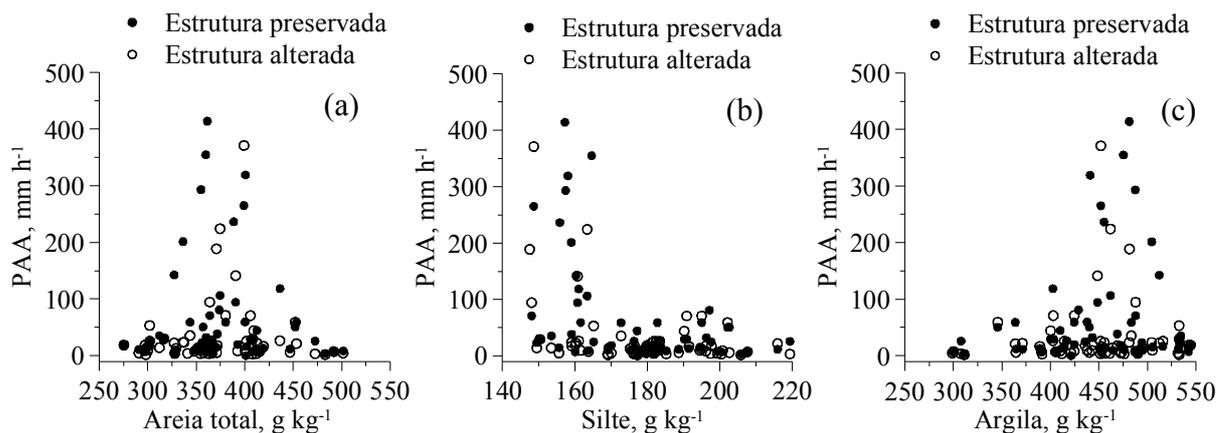


Figura 20 – Relações entre teor de areia total (a), silte (b) e argila (c) com permeabilidade ao ar (PAA) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. **significativo a 1%.

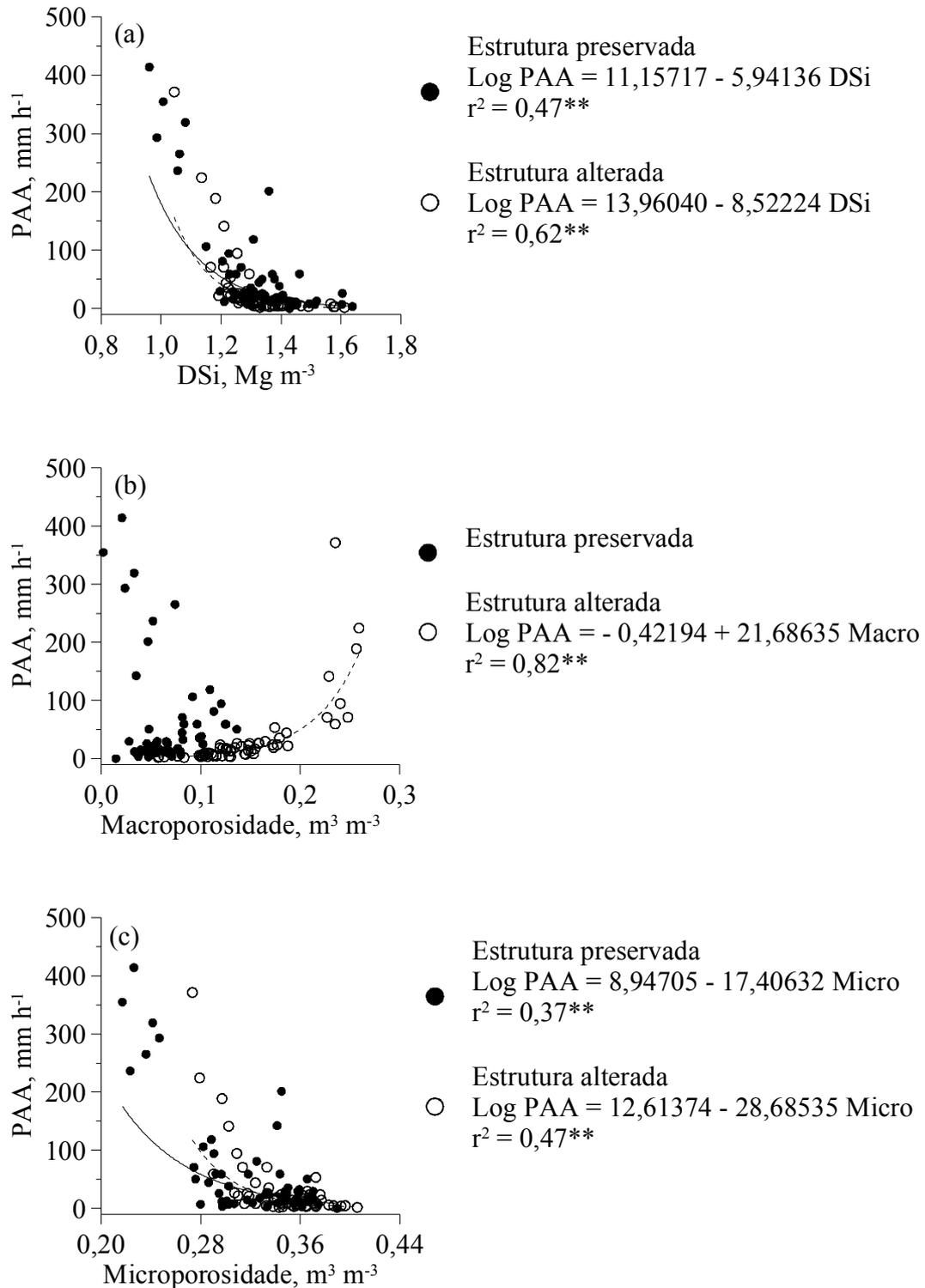


Figura 21 – Relações entre densidade do solo (DSi) (a), macroporosidade (b) e microporosidade (c) com permeabilidade ao ar (PAA) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. **significativo a 1%.

A PAA decresceu exponencialmente com aumento da miroporosidade (Figura 21c). A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total do solo, especialmente a macroporosidade, indicando que, quanto maior a deformação do solo, maiores serão as reduções de macroporosidade e de porosidade total do solo (Silva et al., 2000). No processo de compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (Boone & Veen, 1994), fato que justifica o decréscimo da PAA com incremento da microporosidade.

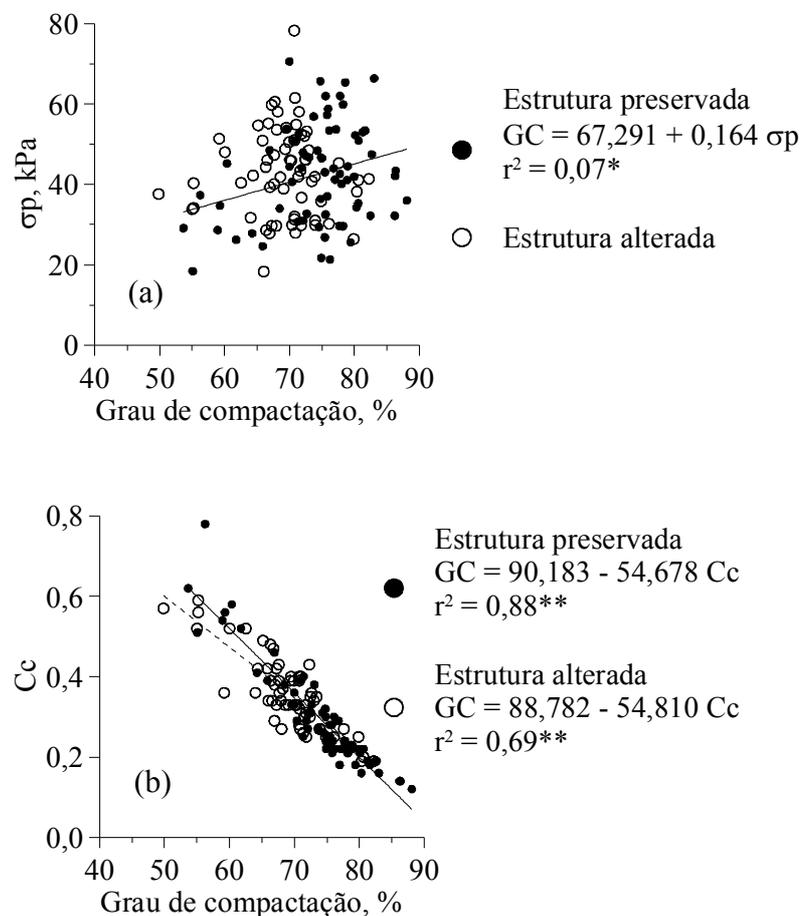


Figura 22 – Relações entre grau de compactação (GC) com pressão de preconsolidação (σ_p) (a) e índice de compressão (C_c) (b) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS. *significativo a 5 %; **significativo a 1%.

O grau de compactação mostrou relação significativa com a σ_p para estrutura preservada (Figura 22a) e com C_c para ambos os tipos de estrutura (Figura 22b). Com aumento do grau de compactação há aumento da σ_p e decréscimo do C_c . Para cálculo do grau

de compactação, a DSref foi aquela obtida ao final do teste de compressão uniaxial, com amostras coletadas na camada de 0,10 – 0,125 m. Para as amostras com estrutura preservada, a DSref para os tratamentos floresta, pastagem, eucalipto 20 e eucalipto 4,5 foram respectivamente, 1,72, 1,72, 1,79 e 1,86 Mg m⁻³, enquanto que para as amostras com estrutura alterada foram, 1,81, 1,88, 1,89 e 1,96 Mg m⁻³.

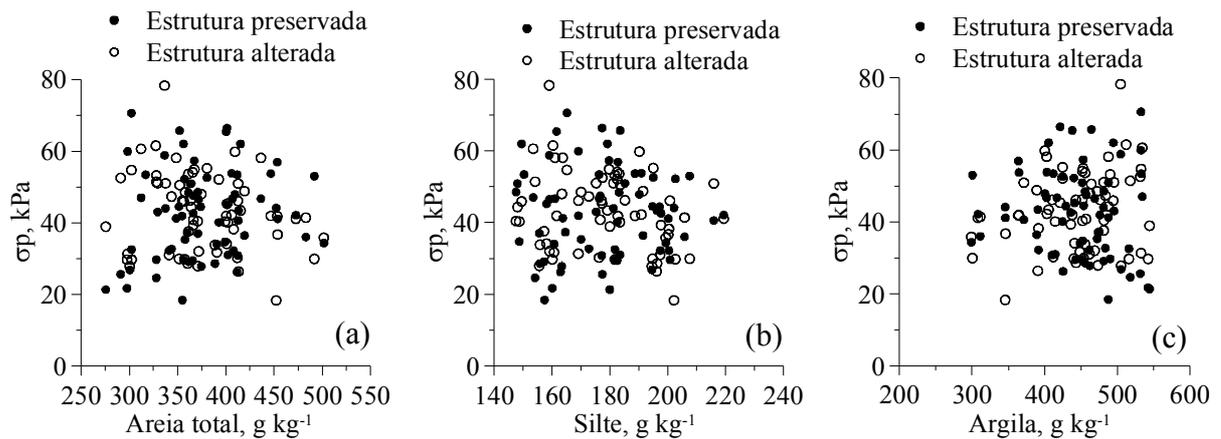


Figura 23 – Relações entre teor de areia total (a), silte (b) e argila (c) com pressão de preconsolidação (σ_p) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

Resultados têm mostrado que o grau de compactação ótimo para algumas culturas anuais, considerando a produtividade, parece estar entre 77 a 88%. (Håkansson, 1990; Carter, 1990; Lipiec et al., 1991; Beutler et al., 2005; Suzuki, 2005; Suzuki et al., 2007). Considerando um grau de compactação de 85% e utilizando a função obtida entre Gc e σ_p para amostras com estrutura preservada, esse Gc corresponderia a uma $\sigma_p = 108$ kPa. Esse valor é superior a 48 e 90 kPa, obtido no capítulo 2 quando relacionado à densidade do solo e à resistência à penetração com a σ_p .

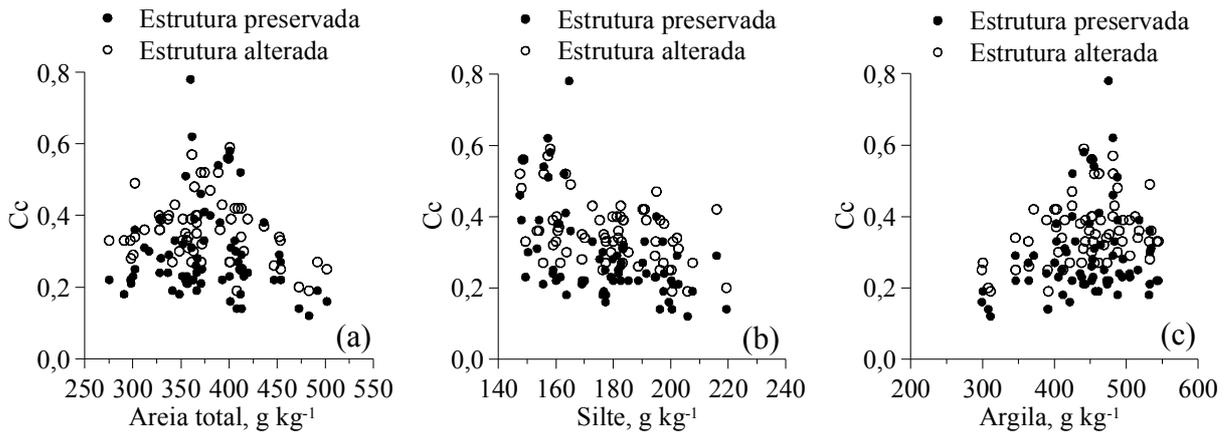


Figura 24 – Relações entre teor de areia total (a), silte (b) e argila (c) com índice de compressão (Cc) para o Argissolo Vermelho distrófico, município de Butiá/RS.

**significativo a 1%.

A σ_p e o Cc das amostras com estrutura preservada e alterada não apresentaram relação com a textura do solo (areia, silte e argila) (Figuras 23 e 24). Embora não se tenha observado relação do Cc com a argila, alguns trabalhos têm verificado essa relação (Larson et al., 1980; Smith et al., 1997a; Smith et al., 1997b; Imhoff et al., 2004).

7.4. Conclusões

A continuidade de poros e sua maior estabilidade devido à atividade biológica e decomposição de raízes é mais importante do que a quantidade de poros para a maior permeabilidade ao ar.

As amostras com estrutura preservada são menos suscetíveis à compactação do que as amostras com estrutura alterada, que são mais sujeitas à deformação e degradação da estrutura do solo.

7.5. Referências

- BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. **Soil Science**, v.68, p.1-13, 1949.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.29, p.843-849, 2005.
- BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.
- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: MA Harvard University, 1936. p.60-64.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.527-535, 2003.
- CURI, N., LARACH, J.O.I., KÄMPF, N., MONIZ, A.C.; FONTES, L.E.F. **Vocabulário da ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.32, p.180-186, 1968.
- GUBIANI, P.I.; REINERT, J.; REICHERT, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, p.664-668, 2006.
- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v.6, p.65-100, 1987.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.105-120, 1990.
- HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts

on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, v.79, p.207-219, 2004.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.17-24, 2004.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.635-660.

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

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.450-457, 1980.

LETEY, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-293, 1985.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.945-951, 2004.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, v.19, p.307-317, 1991.

MANDO, A.; STROOSNIJDER, L.; BRUSSAARD, L. Effects of termites on infiltration into crusted soil. **Geoderma**, v.74, p.107-113, 1996.

PÉREZ GOMAR, E. **Qualidade física de um Vertissolo e produção forrageira em campo nativo melhorado, com irrigação e pastoreio**. 2005. 85 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

REICHERT, J.M.; REINERT, J.M.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.V.; SUZUKI, L.E.A.S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. 16., 2006, Aracaju, **Palestras...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM

REINERT, D.J.; ROBAINA, A.; REICHERT, J.M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Solos, 2006. 306p.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um

Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil & Tillage Research**, v.41, p.53-73, 1997a.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactability and compressibility. **Soil & Tillage Research**, v.43, p.335-354, 1997b.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1159-1167, 2007.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, v.4, p.242-246, 1961.

WIENHOLD, B.J.; ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.L. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. **Environmental Geochemistry and Health**, v.26, p.89-95, 2004.

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

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diferentes usos do solo compactam distintamente, tanto em termos de profundidade quanto em intensidade. Em áreas sob pastagem a compactação concentra-se até aproximadamente 0,10 m, enquanto que em áreas sob colheita mecanizada de eucalipto a compactação pode alcançar até 0,40 m. Talvez a operação mais crítica da colheita florestal seja a retirada da madeira da área, onde ocorre tráfego intenso de máquinas com peso elevado. Somando os resultados desse estudo com os relatos na literatura é praticamente impossível não ocorrer compactação em áreas de colheita florestal mecanizada, sendo uma alternativa para minimizar a compactação na área fixar canais permanentes de tráfego.

Estabelecer valores críticos de propriedades físicas do solo baseados no crescimento e rendimento de culturas perenes é difícil, pois esse tipo de cultura permanece por longos períodos na área e suas raízes, mais extensas e volumosas, aplicam pressões ao solo durante todo o ciclo da cultura, em comparação às culturas anuais. O uso de valores baseados em restrições ao crescimento e rendimento de culturas anuais ou no intervalo hídrico ótimo parece ter sido efetivo para eucalipto e pastagem, possibilitando utilizar esses valores críticos para culturas anuais em culturas perenes e pastagem.

A compactação do solo afeta negativamente a estrutura do solo, nesse caso, a porosidade, densidade e tamanho de agregados do solo. Com aumento da compactação há compressão dos agregados do solo, aumentando seu diâmetro; no entanto, incrementando a densidade e reduzindo o sistema poroso, influenciando os fluxos de ar e água.

O eucalipto 20 apresentou baixo grau de compactação, enquanto a floresta e pastagem apresentaram níveis intermediários e o eucalipto 4,5 grau de compactação elevado. O nível de compactação intermediário foi o mais adequado para a estrutura do solo (porosidade e densidade) e maior armazenamento e disponibilidade de água, além de ser mais eficiente quanto à deformação e suscetibilidade do solo à compactação. No entanto, o eucalipto 20 possui grande potencial para recuperação de áreas para fins não comerciais.

Através de propriedades como a densidade do solo, resistência do solo à penetração e umidade é possível estimar a capacidade de suporte de carga do solo e sua suscetibilidade à compactação, embora as equações necessitam de melhor ajuste de modo a aumentar sua confiabilidade. Esse tipo de estimativa é de grande importância para o planejamento das atividades de colheita e tráfego de animais e máquinas, minimizando os impactos dessas

atividades na estrutura do solo. Com o uso de equipamentos relativamente simples e com menor custo, pode-se obter informações essenciais na prevenção da degradação da estrutura do solo.

A continuidade de poros é mais importante no incremento do fluxo de ar, e talvez também para o fluxo de água. Os poros biológicos, formados pela ação de organismos do solo e decomposição de raízes são efetivos no incremento do fluxo de ar. Em condições de elevada densidade do solo esses poros são fundamentais para infiltração de água e fluxo de ar, evitando a deficiência de oxigênio e a erosão do solo.

Para obtenção de uma densidade referência do solo para cálculo do grau de compactação em áreas de floresta e pastagem, propõe-se a coleta de amostras com estrutura preservada na camada de 0,10 – 0,125 m, equilíbrio das amostras na tensão de 33 kPa e o valor de densidade obtido na pressão de 1600 kPa no teste de compressão uniaxial será considerado como densidade referência.

O grau de compactação e o parâmetro S foram menos efetivos do que a densidade, porosidade e armazenamento de água em identificar o impacto dos usos no solo. Para as condições deste estudo deve-se estabelecer faixas do parâmetro S relacionadas à qualidade do solo, pois as faixas propostas por Dexter (2004a) não foram coerentes para os resultados obtidos neste estudo.

Valores críticos de condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e pressão de preconsolidação são sugeridos neste trabalho, sendo necessários estudos complementares para defini-los com mais precisão.