UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

IMPLICAÇÕES DO USO DO SOLO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO E DE UM GLEISSOLO HÁPLICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcelo Ivan Mentges

Santa Maria, RS, Brasil

2010

IMPLICAÇÕES DO USO DO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO E DE UM GLEISSOLO HÁPLICO

por

Marcelo Ivan Mentges

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil

2010

Mentges, Marcelo Ivan, 1985-
M549i

Implicações do uso do solo nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um argissolo vermelho-amarelo e de um gleissolo háplico / Marcelo Ivan Mentges. – Santa Maria, 2010.
107 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2010.
"Orientador: Prof. José Miguel Reichert"

1. Ciência do solo 2. Solo 3. Uso do solo 4. Compressibilidade 5. Propriedades físico-hídricas I. Reichert, José Miguel II. Título

CDU: 631.4

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

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

IMPLICAÇÕES DO USO DO SOLO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO E DE UM GLEISSOLO HÁPLICO

elaborada por
Marcelo Ivan Mentges

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

Comissão Examinadora:

José Miguel Reichert, Dr.
(Presidente/Orientador)

João Alfredo Braida, Dr. (UTFPR)

Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 23 de julho de 2010

Dedico esta obra a meus pais,
Nolar Ignácio Mentges e Cecília Fank Mentges,
que tanto se dedicam
para que seus filhos possam estudar.

AGRADECIMENTOS

A Deus...

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo durante a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solo e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade e as excelentes condições oferecidas para a realização do curso de mestrado.

Ao professor José Miguel Reichert, pela orientação, amizade e ensinamentos. Também aos professores Dalvan José Reinert e Jean Minella, pela amizade e ensinamentos.

Aos demais professores e funcionários do PPGCS e do DS. Agradecimento especial a Flavio Fontinelli, funcionário do Laboratório de Física do Solo, pela paciência e pelos ensinamentos para que este trabalho fosse adequadamente realizado.

Aos demais colegas do PPGCS, pelo convívio, amizade e ensinamentos.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do solo, Alan Ébano de Oliveira, Andre de Oliveira, Cedinara Santana Morales, Charlote Wink, Claudine Ohana Barcellos Consensa, Débora Tonon Schreiner, Douglas Rodrigo Kaiser, Eracilda Fontanela, Jean Alberto Sampietro, Juliana Prevedello, Luiz Eugênio Jacobs, Mayra de Souza Dettmer, Miriam Fernanda Rodrigues, Nadia Bernardi Bonumá, Pedro Luis Dockhorn, Simone Filipini Abrão e Suzana Ferreira da Rosa, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica, Alencar Xavier, Davi Alexandre Vieira, Lenise Raquel Mentges, Neiva Somavilla Gelain, Tiago Ivan Pereira e Luciano Jacomet, e aos mestrandos Cláudia Alessandra Peixoto de Barros e Eduardo Saldanha Vogelmann, que foram fundamentais para que este trabalho fosse realizado.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do Solo, Fabiano de V. A. Braga, Júlio César Wincher Soares, Leandro Dalbianco, Maurício Kunz e Marcelo Kunz, pela amizade e companheirismo durante esse período. Um agradecimento mais que especial ao amigo e colega Paulo Gubiani, que tantas vezes deixa suas atividades de lado para ajudar seus colegas.

Ao casal David e Vanderléia da Rosa, pela amizade e grandes contribuições, não somente neste trabalho, mas também para a minha formação.

Um super agradecimento a minha noiva Silvia Pretzel, pelo amor, amizade, companheirismo, carinho, compreensão e também pelas importantes correções gramaticais realizadas neste trabalho. Garanto que nunca mais esquecerei que onde se remete a lugar.

Aos meus sogros, Leonel e Ilse, pelo constante apoio.

Aos meus pais, Nolar e Cecília Mentges, que sempre me deram condições para estudar e me apoiaram nas decisões tomadas. Também a minha avó, Anita, e as minhas irmãs, Lenise e Thaís, que sempre me deram força. Também aos cunhados Renato e Emanuel.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação e para a realização deste estudo, meu MUITO OBRIGADO.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

IMPLICAÇÕES DO USO DO SOLO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E MECÂNICAS DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO E DE UM GLEISSOLO HÁPLICO

AUTOR: MARCELO IVAN MENTGES

ORIENTADOR: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de julho de 2010.

A Depressão Central é uma área com rochas sedimentares diversas, apresentando grande variedade de solos. Nas coxilhas são encontrados Argissolos, enquanto que nas várzeas, Planossolos e Gleissolos. As características morfológicas, físicas e químicas definem aptidões quanto ao uso e ao manejo dessas classes de solo. Nos Argissolos, a produção de grãos sob o sistema de semeadura direta é uma prática bastante difundida. Os Gleissolos, pelas suas características hidromórficas, são aptos ao cultivo de arroz irrigado. De maneira geral, o solo mantido em estado natural apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas. No entanto, o uso agrícola altera, normalmente, as propriedades do solo. Com o intuito de analisar o efeito do uso agrícola no solo, foram realizados dois estudos: (1) Comportamento físico-hídrico e mecânico de um Gleissolo Háplico sob diferentes usos; (2) Propriedades físico-hídricas e mecânicas e demanda energética requerida pela haste escarificadora em Argissolo Vermelho-Amarelo sob compactação adicional. Ambos os solos estão localizados na área experimental do Departamento de Solos da UFSM. O primeiro estudo objetivou identificar a influência do uso do solo com cultivo de arroz irrigado nas propriedades físico-hídricas e mecânicas, quando comparado ao solo mantido sem uso agrícola. No segundo estudo, avaliou-se o efeito da compactação nos atributos físico-hídricos e mecânicos e na demanda energética solicitada pela haste escarificadora e analisou-se o comportamento das propriedades físico-hídricas e mecânicas abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora. Para ambos os estudos, foram realizadas as determinações de granulometria, densidade, porosidade e compressibilidade do solo. No primeiro estudo, foi determinada ainda a curva de retenção de água. No segundo estudo, avaliou-se ainda a resistência mecânica à penetração, a condutividade hidráulica saturada, a área e volume mobilizado e esforços solicitados à haste escarificadora. O uso agrícola afetou a qualidade física do Gleissolo Háplico em estudo, elevando os valores de densidade e reduzindo os valores de macroporosidade, sem causar, porém, maiores alterações na porosidade total e na microporosidade, quando comparado ao tratamento mantido sem uso agrícola. O índice de compressão foi significativamente influenciado pela densidade do solo, grau de saturação inicial, teor de silte, teor de silte + argila e teor de carbono orgânico total, enquanto que a pressão de preconsolidação não foi afetada significativamente pelos atributos do solo avaliados. O uso do solo com cultivo de arroz irrigado não alterou a pressão de preconsolidação e o índice de compressão, quando comparado à condição de ausência de uso agrícola. No segundo estudo, observou-se que a compactação elevou a densidade e a resistência mecânica à penetração do Argissolo, reduziu a porosidade total e a macroporosidade, porém sem causar efeitos significativos na microporosidade. O tráfego da pá carregadora de 10 Mg reduziu a suscetibilidade à compactação e elevou a capacidade de suporte de carga até a profundidade de 0,20 m. A compactação aumentou a demanda energética da haste escarificadora em 21,64%, o que elevou os valores médios de esforço de tração de 5,33 para 6,35 kN. A escarificação não elevou o estado de compactação do solo abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora no Argissolo. O uso do solo, de maneira geral, altera as propriedades físicas, hídricas e mecânicas, sendo que essas alterações são dependentes das características do solo e, principalmente, quanto e em que condições o solo é utilizado e manejado.

Palavras-chave: uso do solo, compressibilidade do solo, propriedades físico-hídricas do solo.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

IMPLICATION OF LAND USE ON PHYSICO-HYDRAULIC AND MECHANICAL PROPERTIES IN A ALFISOL AND A ENDOAQUALF

AUTHOR: MARCELO IVAN MENTGES

ADVISER: JOSÉ MIGUEL REICHERT

Place and date of the defense: Santa Maria, July 23, 2010.

The Central Depression is an area with sedimentary rocks, presenting a large variety of soils. In highlands Alfisols are found, whereas in lowlands Planosols and Endoaqualf. The morphological, physical and chemical characteristics define the ability of the use and management of theses soils. In the Alfisols, grain production in no-till system is a very common practice. The Endoaqualfs, because of its hydromorphic characteristics, are used for rice cultivation. In general, the agricultural use changes the soil properties. With the intention to analyze the effect of agricultural use on soil properties two studies were performed: (1) Physico-hydraulic and mechanical behavior of an Endoaqualf under different uses; (2) Soil physico-hydraulic and mechanical properties and chisel energy demand in a compacted Alfisol. Both soils are located in the experimental area of de Soil Department of the UFSM. The objective of the first study was to identify the influence of the soil use with irrigated rice in the physico-hydraulic and mechanical properties when compared to the soil maintained without agricultural use. In the second study, were evaluated the effect of soil compaction on its physico-hydraulic and mechanical properties and on chisel energy demand, and to quantify the behavior of these properties below the chisel working depth. For both studies, the particle size, bulk density, porosity and soil compressibility were determined. In the first study the water retention curve was also determined. In the second study the soil resistance to mechanical penetration, the hydraulic conductivity, the area and mobilized volume and the efforts required by the chisel were also determined. The agricultural use affected the physical quality of the Endoaqualf, increasing the bulk density and reducing the macroporosity values, without cause, however, larger changes in total porosity and microporosity when compared with the treatments maintained without agricultural use. The compression index was significantly influenced by the soil bulk density, initial degree of saturation, silt content, silt + clay content and total organic carbon content, while the preconsolidation stress was not significantly affected by the soil properties evaluated. The soil use with irrigated rice did not alter the preconsolidation stress and the compression index when compared the condition of absence of agricultural use. In the second study, compaction increased both soil the bulk density and resistance to mechanical penetration, reducing the total porosity and the macroporosity, without causing significant effects in microporosity. The traffic of the 10 Mg loader reduced the susceptibility to compaction and increased the load bearing capacity to a depth of 0.20 m. The compaction increased the chisel energy demand in 21,64%, increasing the mean value of traction effort from 5,33 kN to 6,35 kN. Soil chiseling did not increase soil compaction below the chisel working depth in the Alfisol. The use of soil, generally, change the physico-hydraulic and mechanical properties, and these changes are dependent on the soil properties, mainly, how much and under what conditions the soil is used and managed.

Key-words: soil use, soil compressibility, soil physico-hydraulic properties.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– Imagem aérea ilustrando a área em estudo (29º 43’ 9’’S e 53º 42’ 23’’W) (imagem retirada do Google Earth). 30
FIGURA 2 – Área cultivada com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b). 31
FIGURA 3 – Trincheira aberta para a coleta das amostras (a). Amostragem realizada no centro do horizonte (b). 34
FIGURA 4 – Perfil do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b). 34
FIGURA 5 – Curva de retenção de água para o Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação.....46
FIGURA 6 – Curva de retenção de água para o Gleissolo Háplico sem uso agrícola. 47
FIGURA 7 – Comportamento da pressão de preconsolidação em função do grau de saturação inicial (a), densidade do solo (b), teor de argila (c), teor de silte (d), teor de argila e silte (e) e teor de carbono (f) para o Gleissolo Háplico em diferentes usos..50
FIGURA 8 – Comportamento do índice de compressão em função do grau de saturação inicial (a), densidade do solo (b), teor de argila (c), teor de silte (d), teor de argila e silte (e) e teor de carbono (f) para o Gleissolo Háplico em diferentes usos. ** mostram que o modelo ajustado é significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste F. 54
FIGURA 9 – Curva de compressão do solo normalizada para as amostras equilibradas na tensão de 10 kPa nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b). 60
FIGURA 10 – Curva de compressão do solo normalizada para as amostras equilibradas na tensão de 33 kPa nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b). 62
FIGURA 11 – Curva de compressão do solo normalizada para as amostras equilibradas na tensão de 100 kPa nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b). 64
FIGURA 12 – Pressão de preconsolidação (PPC) dos horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b) em

diferentes tensões aplicadas nas amostras. Barras horizontais representam a DMS calculado pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. 66
FIGURA 13 – Índice de compressão (IC) dos horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b) em diferentes tensões aplicadas nas amostras. Barras horizontais representam a DMS calculado pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. 66
FIGURA 14 – Compactação do Argissolo Vermelho-Amarelo efetuada pelo tráfego da pá carregadora (a). Pneu deformando o solo durante o tráfego da pá carregadora (b). 73
FIGURA 15 – Trincheira aberta para a coleta das amostras (a). Amostragem realizada em patamares (b).....74
FIGURA 16 – Anel octogonal acoplado à haste escarificadora e essa ao trator (a). Anel octogonal acoplado à haste escarificadora (b). 77
FIGURA 17 – Resistência mecânica à penetração e umidade volumétrica do solo nos diferentes tratamentos. Tratamentos com letras diferentes nas camadas, diferiram estatisticamente pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. ns. diferença não significativa. 81
FIGURA 18 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0 – 0,10 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, CA: compactação adicional. 84
FIGURA 19 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0,10 – 0,20 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, CA: compactação adicional. 85
FIGURA 20 – Percentis do esforço de tração exigido pela haste escarificadora no Argissolo Vermelho-Amarelo submetido à compactação e semeadura direta. *Médias dos tratamentos com letras diferentes diferiram entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. SD: semeadura direta, CA: compactação adicional. 86
FIGURA 21 – Detalhes da Área Mobilizada, Empolamento e Perfil Natural dos tratamentos estudados. 87
FIGURA 22 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0,20 – 0,30 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, SDesc: semeadura direta escarificado, CA: compactação adicional, CAesc: compactação adicional escarificado. 92

FIGURA 23 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0,30 – 0,40 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, SDesc: semeadura direta escarificado, CA: compactação adicional, CAesc: compactação adicional escarificado. 92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composição granulométrica, densidade de partículas (Dp) e classe textural do Gleissolo Háplico(1). 40
TABELA 2 – Limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e atividade da fração argila (A) do Gleissolo Háplico(1). 40
TABELA 3 – Teor de carbono orgânico total (C), nitrogênio total (N), saturação por bases (V), alumínio trocável (Al), capacidade de troca de cátions potencial (CTCpH7), pH em água (pH), teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis e soma de bases (S) do Gleissolo Háplico(1). 41
TABELA 4 - Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade médias, contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico. 42
TABELA 5 – Água disponível (AD), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico. 48
TABELA 6 – Coeficientes, coeficiente de determinação parcial e do modelo, valor de F e significância das variáveis que estimam o índice de compressão do Gleissolo Háplico. 56
TABELA 7 – Pressão de preconsolidação (σp), índice de compressão (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico com amostras equilibradas na tensão de 10 kPa. 57
TABELA 8 – Pressão de preconsolidação (σp), índice de compressão (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico com amostras equilibradas na tensão de 33 kPa. 61
TABELA 9 – Pressão de preconsolidação (σp), índice de compressão (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico com amostras equilibradas na tensão de 100 kPa. 63
TABELA 10 - Composição granulométrica e densidade de partículas (Dp) do Argissolo Vermelho-Amarelo em estudo. 70

TABELA 11 - Umidade gravimétrica (Ug), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) do Argissolo Vermelho-Amarelo no dia da realização da compactação. 73
TABELA 12 - Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado no Argissolo Vermelho-Amarelo(1) 80
TABELA 13 – Pressão de preconsolidação (σp) e índice de compressão (IC) no Argissolo Vermelho-Amarelo(1). 83
TABELA 14 - Área mobilizada e empolamento ocasionada pela haste escarificadora nos tratamentos em estudo. 87
TABELA 15 - Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado abaixo da linha de atuação da haste escarificadora no Argissolo Vermelho-Amarelo(1). 89
TABELA 16 – Pressão de preconsolidação (σp) e índice de compressão (IC) abaixo da linha de atuação da haste escarificadora no Argissolo Vermelho-Amarelo(1). 90

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 15
2 HIPÓTESES 18
2.1 Estudo 1 18
2.2 Estudo 2 18
3 OBJETIVOS 19
3.1 Estudo 1 19
3.1.1 Objetivo Geral 19
3.1.2 Objetivos Específicos 19
3.2 Estudo 2 19
3.2.1 Objetivo Geral 19
3.2.2 Objetivo Específico 19
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20
4.1 Compactação do solo no sistema de semeadura direta 20
4.2 Compactação e seus efeitos no solo, nas máquinas e nas plantas 21
4.3 Compactação e compressibilidade do solo 23
4.4 Escarificação do solo 25
4.5 Uso do solo e alterações nas propriedades físico-hídricas e mecânicas 26
5 CAPÍTULO 1 28
COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO E MECÂNICO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO SOB DIFERENTES USOS 28
5.1 Introdução 28
5.2 Material e Métodos 30
5.2.1 Local de estudo 30
5.2.2 Tratamentos, delineamento experimental e análise estatística 31
5.2.3 Solo 32
5.2.4 Coleta das amostras 33
5.2.5 Determinações 35
5.3 Resultados e Discussão 39
5.3.1 Caracterização dos solos estudados 39
5.3.2 Propriedades físico-hídricas 41
5.3.3 Fatores que afetam a compressibilidade do Gleissolo Háplico 48
5.3.4 Curva de compressibilidade do solo 56

5.4 Conclusões **67**
6 CAPÍTULO 2 ..... **68**
PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E MECÂNICAS E DEMANDA ENERGÉTICA SOLICITADA PELA HASTE ESCARIFICADORA EM ARGISSOLO SOB COMPACTAÇÃO ADICIONAL **68**
6.1 Introdução **68**
6.2 Material e Métodos **69**
6.2.1 Local e solo 69
5.2.2 Tratamentos, delineamento experimental e análise estatística 70
6.2.3 Coleta das amostras 73
6.2.4 Determinações 75
6.3 Resultados e Discussão **78**
6.3.1 Atributos físico-hídricos 78
6.3.2 Atributos mecânicos 82
6.3.3 Esforços de tração e área mobilizada 85
6.3.4 Atributos físico-hídricos abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora 87
6.3.5 Atributos mecânicos abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora 89
6.4 Conclusões **93**
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS **95**
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **94**

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os solos da região da Depressão Central do Rio Grande do Sul são formados a partir de rochas sedimentares de características diversas, com predomínio de argilitos, siltitos e arenitos da formação Santa Maria. Na região, encontram-se altitudes médias variando entre 40 e 100 m e o relevo caracteriza-se pela ocorrência de amplas planícies aluviais e coxilhas caracterizando um relevo suavemente ondulado a ondulado. Devido à grande diversidade no material de origem e, principalmente, às variações observadas no relevo, uma grande variabilidade espacial de solos é encontrada. A relação entre as diferentes formas do relevo e a distribuição dos tipos de solo é chamada relação solo-paisagem, a qual indica a interação dos fatores e dos processos de formação do solo e permite um primeiro delineamento de diferentes tipos de solos em determinados compartimentos da paisagem.

Duas condições de relevo são marcantes na região da Depressão Central gaúcha: coxilhas e várzeas. No topo das coxilhas, em que o ambiente é bem drenado, ocorrem Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos. À medida que ocorre uma redução na altitude, as características morfológicas se alteram. Na meia encosta das coxilhas, ambiente imperfeitamente drenado, é normal ocorrerem Argissolos Bruno-Acizentados. Os Argissolos são profundos a muito profundos, bem-drenados a imperfeitamente drenados, ocorrendo em relevo suave ondulado até forte ondulado, ocupando, em termos percentuais, a maior parte da área territorial do estado.

Nas planícies aluviais, áreas também conhecidas por várzeas, a deficiente drenagem é uma característica marcante. Nos locais em que pequenas elevações ocorrem, observa-se a ocorrência de Planossolos Háplicos, enquanto que próximo aos cursos d'água, Gleissolos Háplicos. Esses solos são pouco profundos e muito mal drenados e ocupam considerável porcentagem das áreas do Rio Grande do Sul.

A distribuição do solo na paisagem juntamente com o conhecimento das características morfológicas, químicas, físicas e biológicas direciona o uso agrícola dos solos. As características hidromórficas dos solos de várzea os tornam aptos ao cultivo de arroz irrigado, enquanto que, nos ambientes com uma melhor drenagem,

como nas coxilhas, a produção de culturas anuais de sequeiro juntamente com produções florestais e a pecuária merecem destaque.

De maneira geral, o solo mantido em estado natural apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas. No entanto, quando cultivado, alterações nas propriedades do solo ocorrem e o seu comportamento frente aos fatores externos, como cultivos, tráfego de máquinas, entre outros, se modifica. Alterações na estrutura do solo com redução na sua qualidade são as consequências mais frequentes, o que pode, muitas vezes, levar à insustentabilidade do sistema agrícola.

Manejos convencionais de solo que envolvem arações e gradagens são os agentes com maior potencial para a redução da qualidade estrutural dos solos. No caso de áreas de várzea, um ambiente já naturalmente frágil, visto suas características hidromórficas, o cultivo com arroz irrigado sob o sistema convencional e o intenso revolvimento do solo aumentam as chances do sistema não se manter. A alta intensidade de uso com um intensivo tráfego de máquinas nas mais diversas condições de solo (drenado nas condições de preparo e completamente saturado nas operações de colheita) também são potenciais degradantes do solo. No entanto, a maneira como esses solos de várzea se comportam frente ao tráfego das máquinas ainda é pouco conhecida para uma melhor compreensão e avaliação de quão frágil ou quão resistentes esses solos são quanto aos processos potencializadores da compactação.

Que o uso altera as propriedades físicas do solo, de uma maneira geral, é evidente e já comprovado pela pesquisa científica. No entanto, ao longo dos anos, o homem incorpora tecnologia aos sistemas agrícolas, visando, se não uma recuperação, uma estagnação na degradação do solo. Foi assim com a introdução do sistema de semeadura direta, uma importante inovação em relação ao manejo do solo frente às degradações originadas pelo cultivo convencional, principalmente pelos processos erosivos.

Esse sistema, que tem como característica principal o não revolvimento e a manutenção dos restos vegetais das culturas sobre a superfície do solo, reduz significativamente as perdas de solo e água. Porém, com o passar dos anos, essa ausência de revolvimento associada ao tráfego de máquinas agrícolas, as quais, na grande maioria, tiveram seu peso e tamanho aumentados, além das condições

inadequadas de umidade do solo durante as operações, têm causado problemas de compactação.

Devido à compactação, ocorrem alterações na estrutura do solo, podendo essas, na maioria das vezes, afetar negativamente o estabelecimento e o desenvolvimento das culturas com graves consequências na produtividade. Soluções para o problema da compactação têm sido apontadas pela pesquisa. Uma delas é a escarificação do solo, prática mecânica que, além de romper as camadas compactadas, evita que os processos erosivos se potencializem, visto o reduzido revolvimento do solo e a grande quantidade de cobertura vegetal que permanece após a escarificação. Porém, um questionamento pode ser feito: será que essa escarificação, que está sendo realizada com o objetivo de romper a camada compactada, compreendida entre 8 e 15 cm, aproximadamente, não está deslocando o problema para profundidades maiores? Essa pergunta surge visto que, quando os solos eram cultivados convencionalmente, a soleira dos implementos agrícolas ocasionavam compactação em subsuperfície, originando os chamados “pé-de-arado” e “pé-de-grade”.

Considerando a grande variabilidade nas características físicas, químicas, biológicas e morfológicas dos solos ao longo da paisagem, as diferentes condições e diferentes comportamentos em relação ao uso, o entendimento do comportamento físico-hídrico e mecânico dos solos justifica-se. Dessa forma, no presente trabalho, duas pesquisas foram realizadas. A primeira aborda as consequências do uso agrícola de um solo de várzea e procura compreender como se comportam esses solos em relação à capacidade de suporte de cargas e à suscetibilidade à compactação. A segunda pesquisa procura mostrar as consequências de um uso agrícola intensivo do solo, o sistema de semeadura direta, e tenta observar se a solução muitas vezes recomendada quanto aos efeitos da compactação do solo, a escarificação, realmente resolve o problema da compactação. Os estudos foram: “Comportamento físico-hídrico e mecânico de um Gleissolo Háplico sob diferentes usos” e “Propriedades físico-hídricas e mecânicas e demanda energética solicitada pela haste escarificadora em Argissolo sob compactação adicional”.

2 HIPÓTESES

2.1 Estudo 1

O cultivo com arroz irrigado altera as propriedades físico-hídricas e mecânicas do Gleissolo Háplico quando comparado ao solo mantido sem uso agrícola, sendo que as alterações ocorrem nos horizontes superficiais.

O teor de água, a densidade do solo, os teores de argila e silte e o teor de carbono orgânico afetam significativamente a compressibilidade do Gleissolo Háplico, sendo parâmetros fundamentais para a elaboração de funções de pedotransferência para estimar a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação.

2.2 Estudo 2

Alterações nas propriedades físico-hídricas e mecânicas promovidas pela compactação em um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado sob sistema de semeadura direta reduzem a qualidade física e aumentam a demanda energética solicitada às máquinas agrícolas pela haste escarificadora.

A haste escarificadora ocasiona compactação abaixo de sua linha de atuação, causando o chamado “pé-de-arado”.

3 OBJETIVOS

3.1 Estudo 1

3.1.1 Objetivo Geral

Identificar a influência do cultivo de arroz irrigado nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um Gleissolo Háplico em relação ao solo mantido sem uso agrícola.

3.1.2 Objetivos Específicos

Avaliar o comportamento das propriedades físico-hídricas e mecânicas ao longo dos perfis nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico sob diferentes usos.

Avaliar o efeito do teor de água, densidade do solo, teor de argila e silte e teor de carbono orgânico na capacidade de suporte de carga e na suscetibilidade à compactação do Gleissolo Háplico.

Criar pedofunções que estimem a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação do Gleissolo Háplico.

3.2 Estudo 2

3.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da compactação nos atributos físico-hídricos e mecânicos e na demanda energética solicitada pela haste escarificadora e analisar se a escarificação do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico causa compactação abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora.

3.2.2 Objetivo Específico

Avaliar o comportamento das propriedades físico-hídricas e mecânicas abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Compactação do solo no sistema de semeadura direta

No início da década de 1970, surgiu no Brasil o sistema de semeadura direta, visando à redução da degradação do solo, principalmente aquela causada por processos erosivos. Por não haver preparo e os restos vegetais das culturas serem mantidos na superfície do solo, esse sistema proporciona vários benefícios, como maior retenção de água, possibilitando à cultura uma maior resistência a períodos de seca, redução da erosão, o que diminui a perda de solo e fertilizantes e contribui para a manutenção da sustentabilidade do sistema agrícola (SALTON; MIELNICZUK, 1995). Além disso, várias pesquisas observaram aumento nos teores de matéria orgânica em solos cultivados sob este sistema (LOVATO et al., 2004; BAYER et al., 2006), o que ocasiona melhorias nas propriedades físicas (SILVA et al., 2000a; TORMENA et al., 2004) e químicas do solo (BAYER & MIELNICZUK, 1997).

Sem dúvida, o sistema de semeadura direta é eficaz na conservação do solo. Porém, com o passar dos anos, alterações estruturais tem sido identificadas em solos cultivados sob esse sistema (ROSA et al., 2008a; GUBIANI, 2008). Dados publicados e observações visuais indicam que solos sob semeadura direta têm apresentado compactação, a qual ocorre na camada localizada entre 8 cm e 15 cm de profundidade (SILVA, 2003; SUZUKI, 2005; REINERT et al., 2008), provocada pelo confinamento das pressões que ocorrem próximo a essa profundidade. Esta camada foi denominada por Reichert et al. (2009a) de “pé-de-plantio direto”, em analogia à formação de camadas compactadas por arações e gradagens realizadas no sistema de preparo convencional do solo. Acima desta camada a compactação é reduzida, devido ao rearranjamento das partículas do solo e agregados (REICHERT et al., 2003), a maior densidade de raízes das culturas e ao maior teor de matéria orgânica (REINERT et al., 2008). Além disso, Reinert et al. (2008) também consideram o efeito dos ciclos de umedecimento e secagem e a ação dos sulcadores das semeadoras-adubadoras, as quais mobilizam aproximadamente 30% da superfície do solo durante as semeaduras de inverno e verão (GENRO JUNIOR, 2002).

A compactação consiste em um processo de densificação que ocorre no solo quando uma pressão externa é aplicada sobre o mesmo (SOANE & VAN OUVERKERK, 1994). O tráfego de máquinas agrícolas é apontado como a principal fonte geradora dessas pressões, sendo considerado como fator determinante da ocorrência da compactação (LIMA et al., 2006a; VEIGA et al., 2007). Outros fatores também são considerados como a ausência de revolvimento no sistema de semeadura direta (HAKANSSON & MEDVEDEV, 1995), que é restrita apenas a linha de semeadura e atuando em pequenas profundidades, o aumento no tamanho e peso das máquinas agrícolas e na intensidade de uso do solo, repercutindo no aumento da carga exercida sobre ele (MOUAZEN et al., 2003; STRECK et al., 2004) e a utilização errônea da pressão de inflação dos pneus agrícolas (HAKANSSON, 2005). Outro fator que possui grande influência no processo de compactação do solo é a umidade (SILVA et al., 2002a; REICHERT et al., 2007).

Em relação ao solo, deve-se considerar a umidade do mesmo para realizar as operações de preparo, tratos culturais, colheita e transporte (REICHERT et al., 2003), pois o teor de água no momento das operações de campo é fator determinante na ocorrência da compactação e, caso estas operações sejam realizadas com teores de umidade inadequados ou ótimos para a compactação (KLEIN et al., 2008), reflexos negativos serão percebidos nos atributos físicos do solo (BOENI, 2000), comprometendo a produtividade das culturas (SECCO et al., 2004). Assim, o risco de compactação do solo é elevado quando as pressões aplicadas são maiores do que a capacidade de suporte do solo, sendo a umidade uma das responsáveis pela redução da capacidade de suporte (ALAKUKU et al., 2003), pois a água no solo atua como lubrificante entre as partículas, pois reduz a coesão e o atrito, permitindo o deslocamento das mesmas, o que favorece a ocorrência da compactação.

4.2 Compactação e seus efeitos no solo, nas máquinas e nas plantas

Dentre as funções do solo, uma das mais importantes é fornecer ao sistema radicular das plantas um ambiente adequado para o seu crescimento e desenvolvimento, onde as raízes possam crescer sem encontrar impedimentos e suprir-se de água e nutrientes em quantidade necessária para que as plantas

expressem o seu máximo potencial produtivo (ALMEIDA et al., 2008). Em solos compactados essas condições podem não ocorrer.

De acordo com Imhoff (2002), a compactação modifica a estrutura do solo, o que pode resultar em problemas no estabelecimento e desenvolvimento das culturas. Em solos compactados, a densidade é elevada e a porosidade total reduzida, principalmente pela redução na macroporosidade (SOANE; OUWERKERK, 1994; RICHART et al., 2005; LIMA et al., 2006a). Por essas alterações, a resistência do solo à penetração se eleva (SILVA et al., 2000b; REICHERT et al., 2009b), o que pode restringir o desenvolvimento radicular das culturas caso alcance valores mais elevados. Em seus trabalhos, Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Tavares Filho et al. (2001), Lapen et al. (2004) e Silva et al. (2008) afirmam que o valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa tem se mostrado restritivo ao desenvolvimento radicular das plantas.

A compactação também afeta a dinâmica da água no solo. Quando o solo encontra-se em elevado grau de compactação, o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo é aumentado, enquanto a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Consequentemente, o escoamento superficial pode aumentar e o crescimento de plantas pode ser reduzido em virtude da diminuição da disponibilidade de água, restrição ao crescimento das raízes e aeração deficiente (DEXTER, 2004; REICHERT et al., 2007; REICHERT et al., 2009a).

Em relação às máquinas, trabalhos têm observado aumento na energia de tração solicitada às máquinas agrícolas em virtude da compactação do solo (OLIVEIRA et al., 2000; SANCHEZ-GIRON et al. 2005; ROSA et al., 2008a). Em um Latossolo Vermelho Distroférrico com 540 g kg^{-1} de argila, Conte et al. (2007) observaram que a compactação do solo ocasionada pela maior intensidade de pastejo elevou os valores de esforços de tração da haste sulcadora de uma semeadora-adubadora. O efeito do tráfego de uma pá-carregadora ocasionou um aumento de 15,9% na exigência de tração de uma haste escarificadora em um Argissolo Vermelho-Amarelo (ROSA, 2007). A maior demanda energética desencadeia aumento no consumo de combustível, além da redução da vida útil dos mecanismos ativos do trator e da semeadora e maior desgaste dos mecanismos sulcadores, com consequente redução na lucratividade das propriedades rurais (ROSA, 2007).

Em relação às plantas, os efeitos da compactação também têm sido observados. Avaliando a influência da compactação em arroz de sequeiro, Beutler et al. (2004) observaram a redução na produtividade e restrição ao crescimento de raízes. Em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico, Suzuki (2005) encontrou influência direta da compactação na redução da produtividade do milho, sendo que esta cultura também apresentou redução em sua altura e no comprimento radicular. Na cultura do feijoeiro, a compactação adicional reduziu em 29,4% a produtividade em relação ao plantio direto há doze anos em um Argissolo Vermelho distrófico arênico (COLLARES et al., 2006). A compactação em um Argissolo Vermelho distrófico típico elevou a densidade do solo a níveis limitantes às plantas, causando restrições ao crescimento do sistema radicular de plantas de cobertura (REINERT et al., 2008). Densidades variando entre 1,85 a 1,92 Mg m^{-3} provocaram alterações morfológicas nas raízes do nabo, ocorrendo desvio da raiz principal com crescimento no sentido horizontal e o crescimento em profundidade foi limitado.

4.3 Compactação e compressibilidade do solo

A preocupação com a suscetibilidade do solo à compactação reside na determinação de quando o solo está com a umidade adequada para se executarem as operações agrícolas, evitando, assim, sua compactação. Segundo Dias Junior & Pierce (1996), a curva de compressão representa graficamente o logaritmo da pressão externa aplicada a um corpo de prova, simulando a pressão exercida por um pneu agrícola com algum parâmetro ligado à estrutura do solo como o índice de vazios ou a densidade do solo. Ela é dividida em dois segmentos: um curvo, denominado curva de compressão secundária, em que as deformações são elásticas (recuperáveis) no solo e as propriedades físicas se mantêm constantes e outro linear, chamado de reta de compressão virgem, em que as deformações correspondentes são plásticas (não-recuperáveis) e as propriedades físicas do solo alteram-se consideravelmente.

Obtêm-se dois parâmetros principais através do ensaio de compressibilidade: a tensão de pré-consolidação e o coeficiente de compressão. A tensão de pré-consolidação representa o valor máximo que se pode aplicar ao solo sem que esse sofra compactação adicional à sua estrutura (HOLTZ & KOVACS, 1981) e o coeficiente de compressão refere-se ao processo de decréscimo de volume do solo

quando este é submetido à aplicação de uma pressão externa (KOOLEN, 1994). Segundo Suzuki et al. (2008), quanto maior a deformação total da amostra no teste de compressão uniaxial, o solo é mais susceptível à compactação e sua capacidade de suporte de carga é menor.

Os solos sob o sistema de plantio direto tem apresentado alta resistência à deformação, quando avaliado por parâmetros de compressibilidade por Veiga et al. (2007). Quanto maior o estado de compactação, menor será a deformação do solo após a aplicação de uma pressão, pois este pode estar próximo de sua densidade máxima (BRAIDA, 2004; SUZUKI et al., 2008). Também, quanto maior a densidade inicial do solo, menor sua susceptibilidade à compactação, representada pelo índice de compressão (DEBIASI et al., 2008). A menor susceptibilidade à compactação pode estar associada ao elevado estado de compactação, a qual resulta em menor deformação adicional quando altas pressões (superiores à pressão de preconsolidação) são aplicadas ao solo (SUZUKI et al., 2008).

Além desses, outros fatores influenciam na ocorrência da compactação do solo. Trabalhando com um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, Oliveira et al. (2003) observaram que, em menores umidades e maiores porosidades, as deformações ocorridas no teste de compressão uniaxial foram maiores, evidenciando a necessidade de um monitoramento da umidade de solo na tomada de decisão da entrada de máquinas em áreas agrícolas. Em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro, Silva et al. (2006a) observaram redução das pressões de preconsolidação na estação chuvosa em relação à seca, indicando uma menor capacidade de suporte de carga com o aumento da umidade do solo.

A textura também exerce influência sobre a compressibilidade, uma vez que essa atua na capacidade de retenção de água e na coesão, as quais interferem na pressão de pré-consolidação. O comportamento compressivo de diferentes solos com ampla variação textural mostrou que o solo mais argiloso, dada a sua maior capacidade de retenção de água, necessita de maiores cuidados com o tráfego de máquinas, pois apresentou maior susceptibilidade à compactação quando cargas superiores às que o solo já sofreu foram aplicadas (SUZUKI, 2005). Além desses, a matéria orgânica também atua na compressibilidade do solo (BRAIDA et al., 2008), afetando sua elasticidade. Segundo Veiga et al. (2007), a adição de cama de aviário ao solo reduziu os valores da pressão de preconsolidação e aumentou os valores do coeficiente de compressibilidade, implicando em alta suscetibilidade à compactação.

4.4 Escarificação do solo

Para redução ou alívio dos efeitos da compactação nas propriedades do solo e aquelas relacionadas às máquinas agrícolas, a escarificação esporádica do solo sob plantio direto tem se apresentado como uma alternativa viável (CAMARA & KLEIN, 2005a; VIEIRA & KLEIN, 2007; COLLARES et al., 2008). Esta técnica de manejo tem por característica a manutenção de grandes quantidades de palha na superfície, contribuindo na redução das perdas de solo por erosão (CAMARA & KLEIN, 2005a). No entanto, é nas propriedades físicas que seu efeito é mais pronunciado.

A escarificação do solo ocasiona redução nos valores de densidade e aumento na macroporosidade e a porosidade total (MACHADO et al., 1996; KLEIN et al., 2008, REICHERT et al., 2009b). Melhorias hídricas e mecânicas são observadas em solos escarificados, com aumento na infiltração e na condutividade hidráulica do solo saturado (CAMARA & KLEIN, 2005b; VIEIRA & KLEIN, 2007) e redução na resistência à penetração (ABREU et al., 2004; CAMARA & KLEIN, 2005a; COLLARES et al., 2008) em comparação a solos sob semeadura direta. Além dessas, Rosa (2007) e Rosa et al. (2008a) encontraram redução nos esforços solicitados à haste sulcadora, respectivamente, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico e em um Latossolo Vermelho distrófico.

Contudo, a ação da ponteira dos escarificadores pode estar causando compactação abaixo de sua linha de atuação, formando o chamado “pé-de-arado” que, dependendo de sua grandeza, pode impedir o aprofundamento do sistema radicular e também diminuir a infiltração de água no solo (ROSA, 2007). O pé-de-arado é facilmente encontrado em solos cultivados no sistema convencional, no qual várias operações são realizadas no preparo do solo. Em um Latossolo Roxo distrófico de textura muito argilosa, Silva et al. (2000a) observaram uma camada compactada em subsuperficie. A ocorrência de uma camada compactada entre 0,10 e 0,24m em um Latossolo Vermelho foi condicionada pelo preparo do solo com sucessivas gradagens (STONE & SILVEIRA, 1999). No entanto, o estudo da ocorrência de camadas compactadas em solos cultivados sob o sistema de semeadura direta e que foram escarificados a fim de aliviar a compactação é restrita a nível mundial (ROSA, 2007), sendo, entretanto, de grande importância para a

validação dessa técnica de manejo e conservação do solo e da água cultivados sob semeadura direta e que apresentam elevado grau de compactação.

4.5 Uso do solo e alterações nas propriedades físico-hídricas e mecânicas

Em condição natural, sob vegetação nativa, as propriedades físicas dos solos são adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA et al., 2000). A atividade antrópica, principalmente associada a cultivos agrícolas, altera as propriedades físico-hídricas, sendo a magnitude dessas mudanças variável conforme o tipo de solo, condições climáticas, tempo de uso e sistemas de manejo adotados (KAY, 1990). Geralmente, essas alterações são desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004).

Segundo Nascimento et al. (2004), as limitações causadas pelo uso agrícola podem ser de três tipos: (i) limitações que resultam de impedimentos ou dificuldades à execução das práticas de manejo do solo, como por exemplo, declividade acentuada, solos rasos, consistência inadequada, presença de argilas expansivas; (ii) limitações que comprometam a capacidade produtiva da terra (deficiência de ar ou água, baixa CTC, toxidez elevada, alta resistência à penetração das raízes) e (iii) limitações relacionada aos riscos de degradação da terra, como declividade acentuada, textura muito arenosa ou muito argilosa, baixa permeabilidade à água etc. O uso pode causar alterações na estrutura do solo, como a compactação, alteração que pode diminuir a produtividade das culturas e aumentar as perdas de nutrientes, as emissões de gases causadores do efeito estufa e a poluição dos recursos hídricos (LIPIEC et al., 2003).

Dos componentes de manejo, o preparo do solo talvez seja a atividade que mais influi no seu comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura, provocando alterações na mesma (SILVA et al., 1994). Tais alterações são mais pronunciadas quando são empregados sistemas de manejo convencionais do que em relação aos conservacionistas, as quais se manifestam, em geral, na densidade do solo, volume e distribuição de tamanho dos poros e estabilidade dos agregados, influenciando a infiltração da água, erosão hídrica e desenvolvimento das plantas (BERTOL et al., 2004).

Em um Argissolo Amarelo Coeso latossólico de textura média/argilosa, Silva & Cabeda (2006) verificaram um aumento significativo no grau de compactação e uma redução na suscetibilidade à compactação dos solos sob os sistemas de cultivo (sequeiro, irrigado e vinhaça) em relação ao solo da mata, alterações relacionadas ao tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo. O uso agrícola de um Planossolo Háplico de textura franca, tanto no sistema de semeadura direta quanto no cultivo convencional, aumentou a densidade e reduziu a macroporosidade e a porosidade total em relação ao solo sem cultivo (campo nativo), sendo que somente o solo sob campo nativo apresentou condições adequadas ao desenvolvimento de plantas (LIMA et al., 2008). O manejo com semeadura direta e cultivo convencional alterou a estrutura do Latossolo Vermelho argiloso devido à mecanização agrícola, evidenciado pelas alterações significativas na densidade do solo e na macroporosidade, ocorrência verificada nas duas profundidades, quando comparado ao solo sem uso agrícola (OLIVEIRA et al., 2003).

Em um Latossolo Vermelho Distrófico, o teor médio de carbono orgânico para o sistema de uso com cultivo de culturas anuais sob o sistema de manejo convencional, com aração na camada de 0–0,25 m de profundidade e gradagem leve, foi significativamente menor que o do solo sob mata nativa e pousio. O uso do solo reduziu o teor de carbono orgânico em 22 e 31%, respectivamente, em relação ao pousio e a mata. Juntamente com alterações na densidade, essas modificações explicam a ocorrência de mudanças negativas na curva de retenção de água dos solos sob pousio e cultivo, caracterizando o comprometimento da qualidade física e hídrica do solo (MACHADO et al., 2008).

5 CAPÍTULO 1

COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO E MECÂNICO DE UM GLEISSOLO HÁPLICO SOB DIFERENTES USOS

5.1 Introdução

O solo, por ser um componente fundamental na manutenção e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, tem recebido um maior interesse na avaliação e na manutenção de sua qualidade física (LIMA, 2004). Em condições naturais, sob vegetação nativa, o solo apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA et al., 2000). No entanto, a ação antrópica, principalmente através das práticas agrícolas, modifica significativamente as propriedades do solo, o que afeta a estrutura e pode levar à redução da taxa de permeabilidade ao ar e à água e da taxa de infiltração e porosidade de aeração, entre outros aspectos (UHDE, 2009). Outra importante alteração ocorre nos teores de matéria orgânica (BERTOL et al., 2004; SILVA et al., 2006b; ROSA et al., 2008b), principalmente quando o manejo é feito no sistema convencional, baseado em sucessivas lavrações e gradagens, o que resulta no decréscimo dos teores de matéria orgânica originais, consequência geralmente acompanhada pela degradação do solo (SILVA et al., 2006c).

Cada classe de solo responde de uma maneira quanto ao seu uso. A deterioração de qualquer função leva a uma diminuição de sua qualidade, o que diminui a sua capacidade de sustentar sistemas (AZEVEDO, 2004). A distribuição dos solos no ambiente e sua posição na paisagem, juntamente com o conhecimento das principais características físicas, químicas e biológicas, são parâmetros utilizados no planejamento do uso das terras, seja ele agrícola ou urbano, o que permite o seu uso conforme sua vocação, minimizando as chances de degradação ambiental (DALMOLIN & PEDRON, 2004).

Solos de terras baixas, também chamadas de várzeas, naturalmente apresentam limitações, principalmente em suas propriedades físicas, que podem ser potencializadas quando essas áreas são cultivadas. Pelo fato de estarem sujeitas à saturação por água ou alagamentos periódicos, alterações no equilíbrio dos

elementos e dos compostos do solo ocorrem, desencadeando uma série de mudanças, que fazem com que o comportamento desses solos seja completamente diferente do observado em ambientes bem drenados (SOUSA et al., 2006). Nessas áreas, encontram-se associados Gleissolos e Planossolos, ocupando considerável porcentagem das áreas do Rio Grande do Sul (STRECK et al., 2008). Por suas características físicas e morfológicas marcantes, especialmente a sua deficiente drenagem, esses solos são favoráveis ao cultivo do arroz irrigado (PAULETTO et al., 2005), cultura com alta participação na produção de grãos do estado do Rio Grande do Sul. Segundo informações do IRGA (2010), no ano agrícola 2009/2010 foram cultivados 1.095.600 ha com esta gramínea.

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas com solos de várzea, sendo que grande parte dos trabalhos têm avaliado propriedades físicas do solo, como densidade e porosidade (PEDROTTI et al., 2001; PAULETTO et al., 2005; LIMA et al., 2006b; LIMA et al., 2008, BAMBERG et al., 2009), agregação (BORGES et al., 2003; LIMA et al., 2003; REICHERT et al., 2006) e resistência do solo à penetração das raízes (BORGES et al., 2004). De maneira geral, os resultados mostram que o uso do solo ocasiona aumento na densidade, redução na porosidade total, macroporosidade e agregação do solo. No entanto, o estudo do comportamento mecânico dos solos de várzea, especialmente em Gleissolos, é incipiente.

Através da curva de compressão do solo e dos parâmetros por ela estimados, é possível avaliar o processo de compactação (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996), ou seja, a capacidade de suporte de carga e a suscetibilidade à compactação. Para Lima et al. (2008), o monitoramento da qualidade estrutural dos solos de várzea constitui uma etapa importante na definição e nos ajustes de práticas conservacionistas de manejo que garantam a manutenção e a melhoria da qualidade do solo. Para isso, o entendimento da compressibilidade, associada às propriedades físico-hídricas, é fundamental para que a degradação estrutural desses solos seja evitada.

Dessa forma, este trabalho teve por objetivos avaliar a influência do cultivo de arroz irrigado nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um Gleissolo Háplico em relação ao solo mantido sem uso agrícola, além de analisar o efeito do grau de saturação, densidade, granulometria e teor de carbono na compressibilidade e elasticidade desse solo.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Local de estudo

O trabalho foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 1), localizada no município de Santa Maria, situada na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul. A área (coordenadas geográficas 29º 43' 9''S e 53º 42' 23''W) apresenta altitude média de 70 m. O clima da região enquadra-se como "Cfa" (Köppen), caracterizado por ser subtropical úmido, sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e temperatura do mês mais frio variando entre -3°C e 18°C (MORENO, 1961).

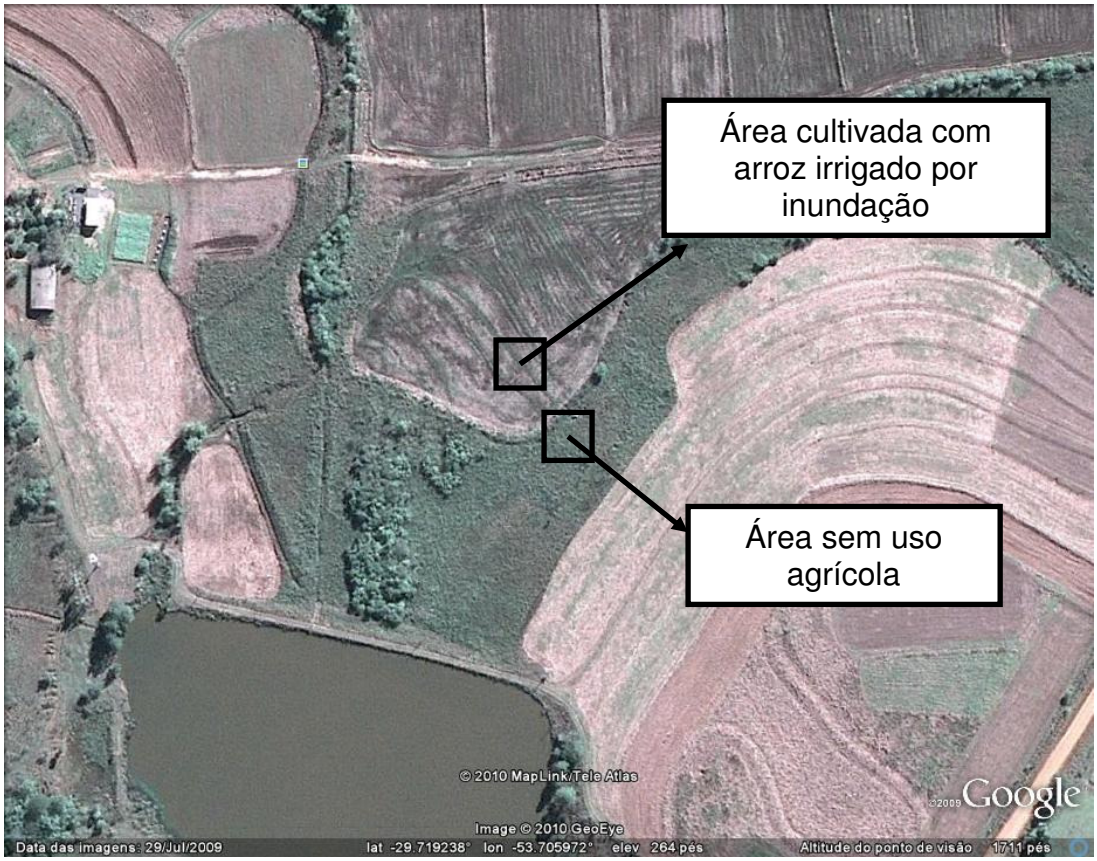

FIGURA 1– Imagem aérea ilustrando a área em estudo (29º 43' 9''S e 53º 42' 23''W) (imagem retirada do Google Earth).

5.2.2 Tratamentos, delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três repetições para cada tratamento. Os tratamentos constaram da combinação de dois níveis de fatores. O fator A refere-se ao uso do solo: (i) cultivado com arroz irrigado por inundação (GXc) e (ii) sem uso agrícola (GXs). O fator D refere-se aos horizontes do solo: (i) horizontes Ap, A, Cg1 e Cg2 para a condição de cultivo com arroz irrigado por inundação e (ii) horizontes A1, A2, Cg1 e Cg2 para a condição de ausência de uso agrícola. Na Figura 2a e 2b estão ilustrados os dois usos avaliados. O cultivo do arroz irrigado por inundação é realizado desde o ano 2002, sob o sistema de cultivo convencional.

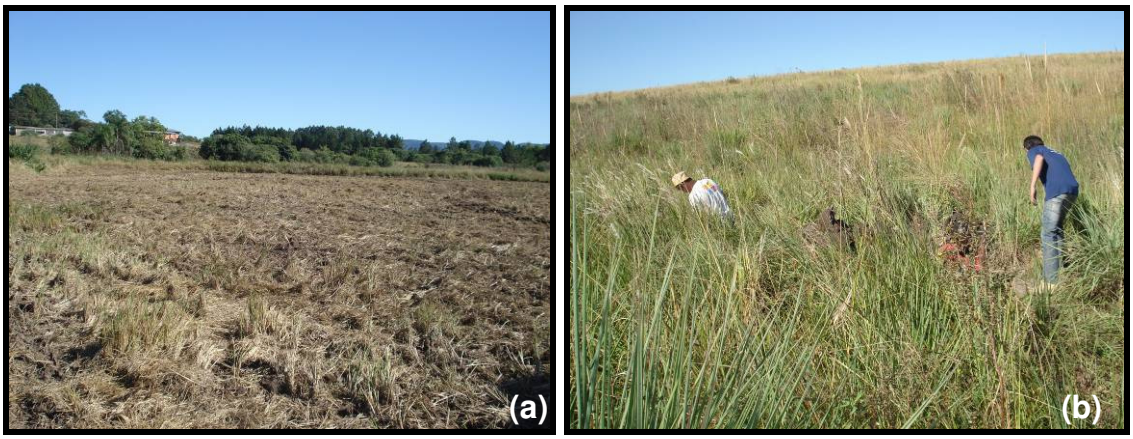

FIGURA 2 – Área cultivada com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b).

O efeito dos tratamentos em relação às propriedades físico-hídricas e mecânicas foi avaliado pela significância dos contrastes ortogonais [1 GXc x -1GXs], [GXc (1Ap 1A x -1Cg1 -1Cg2)], [GXc (1Ap x -1A)], [GXc (1Cg1 x -1Cg2)], [GXs (1A1 1A2 x -1Cg1 -1Cg2)], [GXs (1A1 x -1A2)], [GXs (1Cg1 x -1Cg2)].

O valor de um contraste qualquer é a combinação linear das médias dos tratamentos, definida por $X = \sum_i C_i M_i = C_1 M_1 + C_2 M_2 + C_3 M_3 + \cdots + C_i M_i$, em que X é o contraste, $M_1, M_2, M_3 \ldots M_i$ são as médias dos tratamentos que participam do contraste $C_1, C_2, C_3 \ldots C_i$ são os coeficientes do contraste, definidos de forma que

$\sum_i C_i = 0$, para o atendimento da condição de ortogonalidade. Como critério de padronização e facilidade de interpretação, todas as médias M_i do grupo da esquerda do contraste receberam valores positivos para os coeficientes C_i, e todas as médias M_i do grupo da direita do contraste receberam valores negativos para os coeficientes C_i. Assim, o sinal da estimativa do contraste indica em qual grupo o efeito dos tratamentos é mais pronunciado sobre a variável em consideração. Quando a estimativa do contraste assume sinal positivo, significa que o efeito dos tratamentos do grupo da esquerda é mais pronunciado do efeito dos tratamentos do grupo da direita. Ao contrário, quando a estimativa do contraste assume sinal negativo, significa que o efeito dos tratamentos do grupo da direita é mais pronunciado do efeito dos tratamentos do grupo da esquerda. Cabe esclarecer, também, que os horizontes constituem os tratamentos, os quais foram avaliados em solo sob duas condições de uso (sem e com uso agrícola), e os tratamentos que formam um contraste são os indicados dentro de colchetes, exceto quando os usos são contrastados. A estatística *t* avalia qual a probabilidade (P<t) para a igualdade entre contrastes.

O efeito do teor de água na compressibilidade foi avaliado pela análise de variância, a 5% de probabilidade de erro. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro, com o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2000). No estudo das correlações, fez-se o ajuste das equações através do programa Sigma Plot® 10.0. A significância das equações foi avaliada e, quando significativa a 1% de probabilidade de erro, foi obtido o coeficiente de determinação.

5.2.3 Solo

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), o solo é classificado como Gleissolo Háplico. Porém, houve diferenças quanto à classificação no terceiro e quarto nível categórico. No local cultivado com arroz irrigado, o solo é classificado como Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico (GXc), enquanto que, no local sem uso agrícola, o solo é classificado como Gleissolo Háplico Alítico típico (GXs).

A área com uso agrícola é cultivada com arroz irrigado por inundação desde

2002 sob o sistema de cultivo convencional. No inverno, a área fica sob pousio. O preparo do solo consiste em operações mais profundas, realizadas com arado e operações mais superficiais, por meio de grades. No local mantido sem uso agrícola, a vegetação predominante é composta por campo antropizado, sendo encontradas espécies, como *Eryngium sp.* (Caraguatá), *Baccharis sp.* (Carqueja)*, Erianthus sp*. (Macega), *Melinis sp.* (Capim Gordura)*, Schizachyryum condensatum* (Capim-rabo-de-burro), *Rosmarinus officinalis (*Alecrim), *Aristida pallens* (Capim Barba-de-bode), *Cymbopogon sp. (*Capim Limão), *Xantium strumarium* (Carrapichão), *Rumex crispus* (Língua-de-vaca)*, Zanthoxylum rhoifolium (*Mamica-de-cadela), entre outros. São observadas também espécies florestais pioneiras, como a *Solanum mauritianum (*Fumo Bravo), *Myrsine lorentziana* (Capororoca d'agua) e *Nectandra megapotamica (*Canela Preta).

5.2.4 Coleta das amostras

As amostragens foram realizadas nos dias 6 e 8 de maio de 2009. Primeiramente, foi aberta uma trincheira (Figura 3a) de aproximadamente 1,20 m de profundidade e identificados os horizontes. Na condição de cultivo, foram identificados os horizontes Ap (0,0 – 0,17 m), A (0,17 – 0,40 m), Cg1 (0,40 – 0,70m) e Cg2 (0,70 – 1,00+ m), enquanto que na condição de ausência de uso agrícola, os horizontes identificados foram: A1 (0,0 – 0,25 m), A2 (0,25 – 0,51 m), Cg1 (0,51 – 0,92 m) e Cg2 (0,92 – 1,20+ m). Os perfis do Gleissolo Háplico, nas duas condições estudadas, estão ilustrados na Figura 4. Após, procedeu-se a coleta das amostras, sendo que essas foram extraídas do centro dos horizontes (Figura 3b). As amostragens foram realizadas com auxílio de uma pá de corte, martelo, extrator, colher de construção civil e estilete. Convém ressaltar que a área cultivada com arroz irrigado havia sofrido uma leve gradagem aproximadamente dez dias antes da coleta das amostras.

FIGURA 3 – Trincheira aberta para a coleta das amostras (a). Amostragem realizada no centro do horizonte (b).

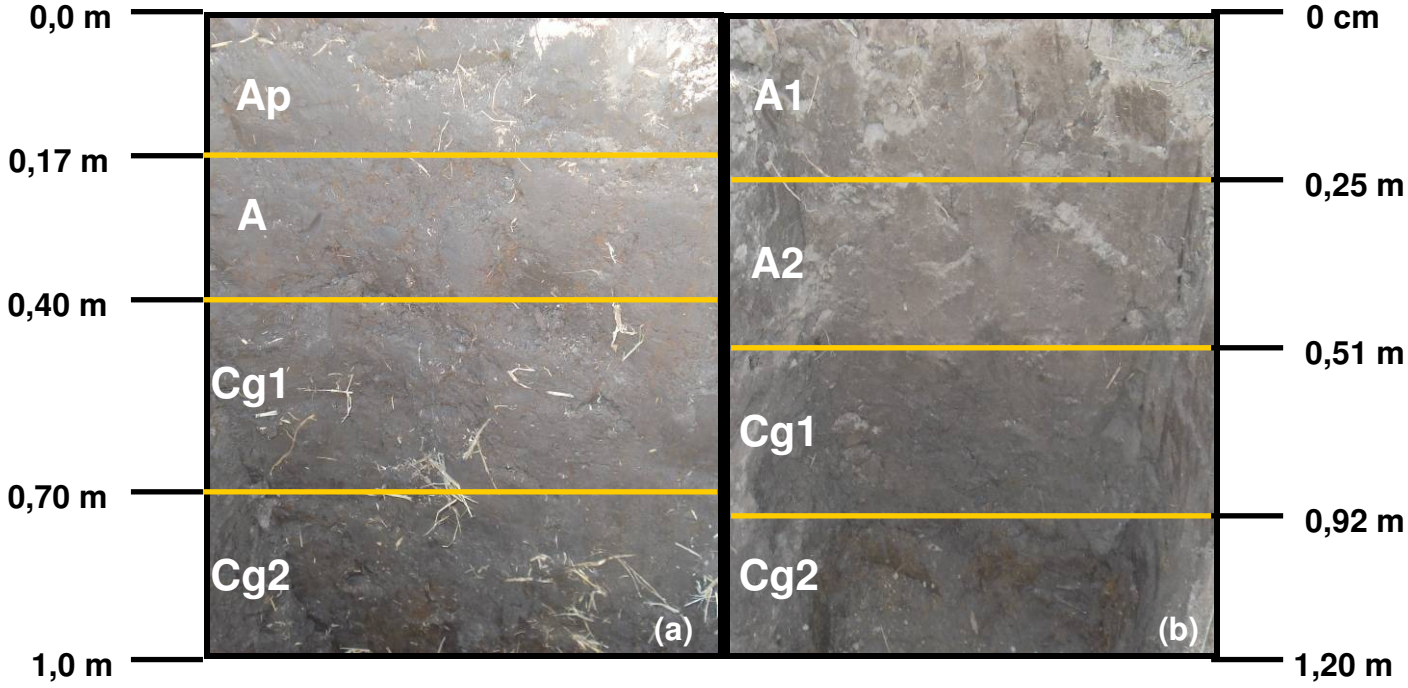

FIGURA 4 – Perfil do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b).

Amostraram-se três pontos dentro de cada condição de uso do solo e, em cada ponto, três repetições foram realizadas, o que totaliza 9 amostras por tratamento. Foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e preservada. As primeiras foram utilizadas para a determinação de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, o índice de plasticidade e densidade de partículas, teor de carbono e demais propriedades químicas do solo. Com anéis de aço

inoxidável de 0,075 m de diâmetro e 0,04 m de altura, as amostras com estrutura preservada foram coletadas a fim de determinar a densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo e curva de retenção de água e, com cilindros de 0,061 m de diâmetro de 0,03 m de altura, para o ensaio de compressão uniaxial. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria a fim de que as determinações fossem realizadas.

5.2.5 Determinações

a) Análise granulométrica e densidade de partículas

A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A dispersão das 20 g de solo seco ao ar usadas na determinação foi realizada por meio de agitação horizontal, com 120 rpm e durante 4 horas, além da utilização de NaOH 6 % (dispersante químico) e duas esferas de nylon (dispersante mecânico), conforme método descrito por Suzuki et al. (2004a,b). A densidade de partículas foi determinada pelo método do Balão Volumétrico Modificado proposto por Gubiani et al. (2006).

b) Consistência do solo e atividade da fração argila

Para determinar a consistência do solo, fez-se necessária a determinação dos limites de liquidez e plasticidade, segundo Embrapa (1997). Para a determinação do limite de liquidez, aproximadamente 100g de terra fina seca ao ar foram transferidas para um gral de porcelana, ao qual foi adicionada água, até formar uma massa homogênea semi-fluída. Essa massa foi colocada na cápsula do aparelho de Casagrande e nivelada com auxílio de uma espátula, de modo que a parte central ficasse com espessura de aproximadamente 1 cm. Após, fez-se uma fenda na parte central da amostra, acionou-se a manivela do aparelho, girando-a na velocidade de 2 rotações por segundo, registrando o número de quedas necessários para fechar a fenda. Para que o procedimento esteja correto, o número de quedas deve ficar entre 12 e 38. Após a realização do teste, foi determinada a umidade do solo utilizado, sendo esta o limite de liquidez. Quando não foi possível fechar a fenda com 25

quedas (número de quedas que determina o limite de liquidez), utilizou-se a seguinte equação para ajuste:

$$LL = Wn\left(\frac{N}{25}\right)^{0,12} \quad (1)$$

em que:
LL = limite de liquidez (kg kg^{-1});
W_n = percentagem de umidade correspondente a N pancadas;
N = número de pancadas da determinação.

O limite de plasticidade foi determinado com uma amostra de solo de mais ou menos 15g, adicionando um pouco de água para formar uma bola na palma da mão. Com as mãos, rolou-se essa bola sobre uma lâmina de vidro até formar um bastão de aproximadamente 3 a 4 mm de diâmetro. A amostra foi remodelada e a operação foi repetida até que o bastão começasse a se romper ao atingir o diâmetro especificado. Atingindo essa condição, os bastões de solo foram levados para a estufa a fim de determinar o teor de água do solo.

O índice de plasticidade foi determinado conforme a seguinte equação:

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

em que:
IP = índice de plasticidade;
LL = limite de liquidez (kg kg^{-1});
LP = limite de plasticidade (kg kg^{-1});

A atividade da fração argila (A) foi determinada segundo Holtz & Kovacs (1981). Este índice é obtido pela divisão entre o índice de plasticidade e o teor de argila do solo. Argilas com atividade de aproximadamente 1 (0,75 < A < 1,25) são classificadas como “normais”; argilas são consideradas inativas quando A < 0,75 e argilas são consideradas ativas quando A >1,25.

c) Teor de carbono e demais propriedades químicas

Os teores de carbono orgânico total e os de nitrogênio foram determinados em um autoanalisador elementar modelo Flash 1112. Para as demais propriedades químicas determinadas, amostras de solo foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. Nessas determinações foram utilizadas as metodologias propostas por Tedesco et al. (1995).

d) Densidade e porosidade do solo

A fim de determinar a densidade, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade do solo, amostras com estrutura preservada foram coletadas. Em laboratório, foi realizado o toalete das amostras, procedimento que ajustou a quantidade de solo ao volume do anel. Após, um disco de pano foi fixado na base do anel por meio de atilho de borracha e as amostras foram colocadas para saturar durante 24 horas. Depois de saturado, esse conjunto de amostras foi levado à coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006) e aplicou-se uma tensão de 6 kPa até estabelecer um equilíbrio entre a água extraída da amostra e a tensão aplicada. O teor de água retida na amostra nessa tensão representa a microporosidade do solo. Após, as amostras foram levadas à estufa até apresentarem peso constante. O peso do solo seco em estufa dividido pelo volume dos cilindros determina a densidade do solo. Já a porosidade total foi estimada subtraindo-se o peso do solo saturado pelo peso desse seco. A macroporosidade, por sua vez, foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

e) Curva de retenção de água

A curva de retenção de água no solo foi determinada associando tensões aplicadas em amostras de solo indeformadas e a umidade residual após a aplicação de cada tensão. Para isso, as amostras de solo foram saturadas e submetidas às tensões de 1 kPa, 6 kPa e 10 kPa em uma coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006) e 33 kPa e 100 kPa em câmara de pressão de Richards. O conteúdo gravimétrico nas tensões de 500 kPa e 1500 kPa foi obtido através de um

potenciômetro de ponto de orvalho (dewpoint potentiometer) - WP4, utilizando amostras com estrutura deformada.

Através do programa SWRC (DOURADO NETO et al., 2001,) obtiveram-se os parâmetros empíricos α, n e m, que foram usados para o ajuste das curvas de retenção de água, realizado segundo modelo proposto por Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (3)$$

em que:

θ : conteúdo volumétrico de água ($cm^3\ cm^{-3}$);

θr: umidade volumétrica residual ($cm^3\ cm^{-3}$);

θs: umidade volumétrica no ponto de saturação ($cm^3\ cm^{-3}$);

ψ : tensão de água no solo (cm H_2O);

α, n e m: coeficientes empíricos.

A água disponível (AD) foi considerada como sendo a água armazenada no solo entre as tensões de 10 kPa e 1500 kPa, tensões essas usadas para representar, respectivamente, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

f) Ensaio de compressão uniaxial

A compressibilidade do solo foi determinada segundo a norma NBR-12007/90 (ABNT, 1990), com alteração no tempo de aplicação das cargas. Para tal, utilizou-se um consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) com indicador digital da carga aplicada e leitura analógica da deformação da amostra.

Foram aplicadas cargas sucessivas e estáticas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa, com aplicação de pressão por meio de ar comprimido. Cada carga foi aplicada durante cinco minutos, pois, de acordo com Silva et al. (2000c), mais de 99 % da compactação é alcançada nesse tempo de aplicação de carga. Após a realização do ensaio, as amostras foram secas em estufa até peso constante e, em seguida, novamente pesadas, para que a umidade no momento da realização do ensaio e a densidade do solo pudessem ser determinadas.

Os dados obtidos no ensaio foram processados no programa computacional COMPRESS (REINERT et al., 2003), com o qual foi calculada a curva de compressão uniaxial para cada amostra, conforme método de Casagrande (HOLTZ & KOVACS, 1981), utilizando a opção manual de ajuste (método 2). Com a finalidade de eliminar o efeito da compactação do solo, as curvas de compressão foram normalizadas, ou seja, dividiu-se o índice de vazios ao final de cada carga aplicada pelo índice de vazios inicial (Iv/Ivi).

Com o objetivo de avaliar o efeito do conteúdo de água na compressibilidade do solo, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em amostras equilibradas em três diferentes tensões de água (10, 33 e 100 kPa). Em uma coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006), as amostras foram equilibradas na tensão de 10 kPa e, usando câmaras de pressão de Richards, as amostras foram homogeneizadas quanto a seu teor de água nas tensões de 33 e 100 kPa.

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Caracterização dos solos estudados

A composição granulométrica, a classe textural e a densidade de partículas estão dispostas na Tabela 1. Observa-se que os solos apresentaram um comportamento, em profundidade, inverso quanto à granulometria. Enquanto no Gleissolo Háplico cultivado, o teor de argila diminuiu e a quantidade de areia aumentou com a profundidade, no solo sem uso agrícola houve um acréscimo no teor de argila.

Na Tabela 2 estão expostos os limites de liquidez e plasticidade, o índice de plasticidade e a atividade da fração argila, enquanto as características químicas estão apresentadas na Tabela 3. Percebe-se que houve uma tendência de redução nos limites de liquidez e plasticidade e no índice de plasticidade à medida que a profundidade do solo aumentou, exceto para o horizonte Cg2 do solo sem uso agrícola, que apresentou maiores valores de índice de plasticidade e limite de liquidez, visto seu maior incremento de argila em relação aos demais horizontes.

TABELA 1 - Composição granulométrica, densidade de partículas (Dp) e classe textural do Gleissolo Háplico[(1)].

Horizontes	Areia	Silte	Argila	Dp	Classe Textural
	----------g kg^{-1}----------			g cm^{-3}	
----------GXc----------					
Ap	136	508	356	2,32	franco argila siltosa
A	199	487	315	2,41	franco argila siltosa
Cg1	324	398	278	2,42	franco argilosa
Cg2	333	374	293	2,44	franco argilosa
----------GXs----------					
A1	129	637	234	2,37	franco siltosa
A2	110	587	303	2,41	franco siltosa
Cg1	104	578	317	2,43	argilo siltosa
Cg2	102	436	461	2,46	argilo siltosa

(1) GXc: Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação; GXs: Gleissolo Háplico sem uso agrícola.

TABELA 2 – Limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e atividade da fração argila (A) do Gleissolo Háplico[(1)].

Horizontes	LL	LP	IP	A
	----------kg kg^{-1}----------			
----------GXc----------				
Ap	0,42	0,34	0,08	0,24
A	0,38	0,29	0,09	0,27
Cg1	0,31	0,23	0,08	0,28
Cg2	0,29	0,21	0,08	0,26
----------GXs----------				
A1	0,38	0,32	0,06	0,27
A2	0,36	0,29	0,07	0,23
Cg1	0,35	0,27	0,08	0,26
Cg2	0,44	0,32	0,12	0,24

(1) GXc: Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação; GXs: Gleissolo Háplico sem uso agrícola.

Nas características químicas dos solos em estudo (Tabela 3), pode-se destacar a redução dos teores de carbono orgânico total à medida que a profundidade do solo aumentou, porém encontram-se maiores teores desse nos horizontes superficiais do solo cultivado. Esse comportamento é explicado pelo maior aporte de massa seca pela cultura do arroz, além do maior período do solo sob ambiente anaeróbico, em função da irrigação, o que afeta a atividade dos

microorganismos. Outra característica marcante do solo sem uso agrícola é o maior teor de alumínio trocável, fator que fez com que os solos sob as duas condições de uso fossem diferentes no terceiro nível categórico.

TABELA 3 – Teor de carbono orgânico total (C), nitrogênio total (N), saturação por bases (V), alumínio trocável (Al), capacidade de troca de cátions potencial (CTCpH7), pH em água (pH), teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis e soma de bases (S) do Gleissolo Háplico(1).

Horizontes	C	N	V	Al	CTCpH7	pH	P	K	S
	----------%----------			----$cmol_c/dm^3$----		%	--------mg/dm^3--------		
----------GXc----------									
Ap	2,74	0,24	36,67	2,23	14,40	5,03	3,97	38,67	9,00
A	1,92	0,16	23,00	3,63	14,00	5,10	1,47	17,33	5,17
Cg1	1,40	0,11	23,33	3,20	15,33	5,10	2,47	22,67	4,90
Cg2	1,28	0,09	23,00	3,07	17,60	5,10	2,23	18,67	4,53
----------GXs----------									
A1	1,92	0,17	18,67	4,73	10,80	5,07	2,70	24,00	5,63
A2	1,49	0,11	18,67	3,67	13,13	5,17	1,70	20,00	5,37
A3	1,32	0,09	21,00	4,03	14,60	5,17	2,47	21,33	4,87
Bg	1,22	0,10	21,33	8,43	23,17	5,23	0,97	28,00	3,97

(1) GXc: Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação; GXs: Gleissolo Háplico sem uso agrícola.

5.3.2 Propriedades físico-hídricas

Os valores médios de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade dos tratamentos, juntamente com os contrastes, a estimativa dos contrastes, o valor t e a significância dos contrastes avaliados estão dispostos na Tabela 4. O cultivo aumentou significativamente a densidade do solo. Esse comportamento se deve às práticas de cultivo realizadas na área cultivada, em especial ao tráfego intenso das máquinas agrícolas, principal responsável pela ocorrência da compactação do solo (LETEY, 1985; SOANE & OUWERKERK, 1994; RICHART et al., 2005). Outros fatores ligados às máquinas agrícolas também são importantes, como a utilização errônea da pressão de inflação dos pneus agrícolas (HÅKANSSON, 2005) e realização das operações agrícolas com teores inadequados de água no solo (REICHERT et al., 2007; KLEIN et al., 2008).

TABELA 4 - Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade médias, contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico.

Perfil*	Horizontes	Médias	Contraste	Estimativa	t	Pr > t
			Densidade do solo (g cm^{-3})			
GXc	Ap	1,19	GXc x GXs	0,4645	4,61	0,0003
	A	1,34	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	-0,3963	-5,57	<,0001
	Cg1	1,43	GXc[A x Ap]	0,1513	3,01	0,0084
	Cg2	1,50	GXc[Cg1 x Cg2]	-0,0731	-1,45	0,1659
GXs	A1	1,09	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]	-0,2846	-4,00	0,0010
	A2	1,27	GXs[A1 x A2]	-0,1807	-3,59	0,0025
	Cg1	1,37	GXs[Cg1 x Cg2]	0,0954	1,90	0,0761
	Cg2	1,27	-	-	-	-
			Porosidade Total (m m^{-3})			
GXc	Ap	0,530	GXc x GXs	-0,1690	-3,65	0,0021
	A	0,472	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,1227	3,75	0,0017
	Cg1	0,455	GXc[A x Ap]	-0,0579	-2,50	0,0236
	Cg2	0,425	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0304	1,32	0,2060
GXs	A1	0,557	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]	0,0459	1,40	0,1794
	A2	0,492	GXs[A1 x A2]	0,0647	2,80	0,0129
	Cg1	0,468	GXs[Cg1 x Cg2]	-0,0670	-2,80	0,0106
	Cg2	0,535	-	-	-	-
			Macroporosidade (m m^{-3})			
GXc	Ap	0,053	GXc x GXs	-0,0779	-2,60	0,0179
	A	0,034	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,0063	0,30	0,7679
	Cg1	0,042	GXc[A x Ap]	-0,0193	-1,30	0,2095
	Cg2	0,040	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0024	0,16	0,8746
GXs	A1	0,110	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]	0,0942	4,51	0,0004
	A2	0,061	GXs[A1 x A2]	0,0497	3,37	0,0039
	Cg1	0,044	GXs[Cg1 x Cg2]	0,0109	0,74	0,4722
	Cg2	0,033	-	-	-	-
			Microporosidade (m m^{-3})			
GXc	Ap	0,477	GXc x GXs	-0,0912	-2,64	0,0177
	A	0,438	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,1164	4,77	0,0002
	Cg1	0,413	GXc[A x Ap]	-0,0386	-2,24	0,0400
	Cg2	0,385	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0281	1,63	0,1233
GXs	A1	0,447	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]	-0,0483	-1,98	0,0652
	A2	0,432	GXs[A1 x A2]	0,0150	0,87	0,3975
	Cg1	0,424	GXs[Cg1 x Cg2]	-0,0778	-4,51	0,0004
	Cg2	0,502	-	-	-	-

* os perfis representam as condições com (GXc) e sem (GXs) uso agrícola.

Comparando os efeitos do uso agrícola com a ausência de cultivo, Pedrotti et al. (2001) e Bamberg et al. (2009), respectivamente, em um Planossolo Solódico e um Planossolo Háplico, ambos de textura média argilosa, observaram que houve um incremento na densidade quando o solo foi cultivado com arroz irrigado, sendo que

esse foi maior na camada de 0,10 m a 0,20 m. Os autores atribuíram à ocorrência dessa camada compactada, conhecida como pé-de-arado, à ação contínua dos implementos agrícolas durante o preparo convencional do solo e ao tráfego das máquinas agrícolas.

Como a amostragem no presente trabalho foi realizada no centro de cada horizonte, no tratamento com uso agrícola foi avaliada a camada compreendida entre 0,08 – 0,12 m, profundidade em que já se observa a ocorrência de compactação em cultivos de arroz irrigados realizados sob o sistema convencional. O sistema de preparo convencional ocasiona compactação subsuperficial em virtude da mobilização e descompactação mecânica da camada mobilizada ao mesmo tempo em que a carga aplicada apresenta efeito acumulativo em subsuperfície ao longo dos anos (HÅKANSSON et al.,1988).

Em ambos os usos, a densidade aumentou significativamente em profundidade, como indicado pelos contrastes GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)] e GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2). Esses contrastes avaliam o efeito da estrutura e, apesar dos horizontes superficiais estarem sujeitos à influência de fatores externos, como o manejo do solo e o tráfego de máquinas agrícolas, a densidade não aumentou ao ponto de ser semelhante à densidade dos horizontes subjacentes. Esse comportamento se deve à ausência de estrutura dos horizontes mais profundos (Cg1, Cg2), que foram pouco afetados por processos pedogenéticos (STRECK et al., 2008), pois apresentam-se na forma maciça, enquanto que nos horizontes superficiais, uma estrutura prismática foi observada.

Os contrastes entre os horizontes superficiais em ambos os usos, GXc[A x Ap] e GXs[A1 x A2], indicam que ocorreram diferenças significativas. Essas se devem às diferentes profundidades de amostragem amostradas, além do efeito das práticas de manejo, como arações e gradagens, que desestruturam o solo e reduzem a densidade e a atividade biológica, geralmente maior nos horizontes superficiais. Não houve significância dos contrastes quando comparados os horizontes mais profundos (Cg1 e Cg2).

O cultivo do solo com arroz irrigado sob o sistema convencional reduziu significativamente a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade quando comparado a condição de ausência de uso agrícola (GXc x GXs) (Tabela 4). Este comportamento se deve ao efeito do manejo dado ao solo a cada ano, em que arações e gradagens são realizadas a fim de preparar o solo para posterior

semeadura da cultura do arroz e ao tráfego das máquinas, que, pelas pressões aplicadas, afetam a estrutura, causando reduções na porosidade total, principalmente pela redução na macroporosidade. Além disso, na condição de ausência de uso agrícola, a estrutura do solo é menos perturbada e favorece a manutenção da atividade biológica do solo. A ação de organismos, como minhocas e besouros, e a ação de sistemas radiculares agressivos pode contribuir para a recuperação de solos compactados, pela formação de poros biológicos e adição de matéria orgânica (REICHERT et al., 2007), o que afeta consideravelmente a macroporosidade.

Os efeitos do uso agrícola em relação à porosidade total foram avaliados em vários trabalhos. Em um Planossolo Háplico de textura franca, Lima et al. (2008) observaram que o uso do solo, tanto no sistema plantio direto quando no sistema de cultivo convencional, reduziu a macroporosidade e a porosidade total, sem causar diferenças na microporosidade em relação ao solo sob campo nativo. Em um Latossolo Vermelho Acriférrico argiloso, a área de mata nativa apresentou melhor qualidade física quando comparada às áreas submetidas à ação antrópica (ARATANI et al., 2009). No entanto, Pauletto et al. (2005), avaliando o uso de um Gleissolo Háplico de textura média, observaram que o período de três anos de condução do experimento foi insuficiente para que os diferentes tratamentos mostrassem efeitos significativos nos atributos densidade e porosidade do solo.

É considerada necessária uma porosidade de aeração superior a 0,10 m^3 m^{-3} para o crescimento satisfatório de plantas (REICHERT et al. 2007; 2009a). Na condição de ausência de uso agrícola, esse valor foi obtido, enquanto que no solo cultivado, o valor de macroporosidade observado no horizonte Ap ficou abaixo desse limite (0,053 m^3 m^{-3}). No entanto, para o arroz, cultura adaptada a ambientes com deficiência de oxigênio, esta condição não seria limitante, já que a presença de aerênquima no colmo e nas raízes da planta possibilita a passagem de oxigênio do ar para a camada da rizosfera (SOSBAI, 2005).

Na área com uso agrícola, o contraste GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)] mostra que a porosidade total foi maior e estatisticamente significativa nos horizontes superficiais. Além disso, o contraste GXc[A x Ap] comparando os dois horizontes superficiais foi significativo, com menor porosidade total no horizonte A em relação ao horizonte Ap. Esse comportamento já era esperado, pois, geralmente, o incremento na densidade, seja por fatores externos ou características intrínsecas do solo, vem acompanhado

da redução na porosidade total, principalmente devido à redução dos macroporos. Em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico, Streck et al. (2004) observaram incremento na porosidade total e na macroporosidade, sem aumento na microporosidade quando o estado de compactação foi elevado.

Na condição de ausência de uso agrícola, os contrastes foram significativos quando comparados os horizontes A1 e A2 e os horizontes Cg1 e Cg2. O contraste GXs[A1 x A2] mostra que a porosidade total foi maior no horizonte A1 em relação ao horizonte A2, fato devido à maior densidade do segundo horizonte e também à ausência de cultivo, o que proporciona uma maior atividade biológica e, por consequência, uma maior macroporosidade, fato observado na Tabela 4 (contraste GXs[A1 x A2] para a variável macroporosidade). O horizonte Cg2 apresentou um incremento na porosidade total (0,535 m^3 m^{-3}), o que diferiu estatisticamente do horizonte Cg1 (0,468 m^3 m^{-3}) O comportamento observado no horizonte Cg2 pode ser explicado pela alta microporosidade observada (0,502 m^3 m^{-3}), que foi estatisticamente diferente do horizonte Cg2, devido ao fato desse horizonte apresentar, aproximadamente, 15% a mais de argila que os horizontes adjacente, fator que, associado à ausência de estrutura, explica a elevada microporosidade, o que repercute na alta porosidade total.

Nas amostras coletadas na área cultivada, observou-se que a microporosidade foi significativamente maior nos horizontes superficiais (Ap e A) e menor nos horizontes Cg1 e Cg2 e também maior no horizonte Ap quando comparado ao horizonte A. Esse comportamento, como citado anteriormente, deve-se em grande parte aos tipos de estrutura observados nos horizontes, fato também responsável pelas diferenças observadas no contraste GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2) para a variável macroporosidade na condição de ausência de uso agrícola.

A relação existente entre o teor de água e sua energia de retenção define a curva de retenção de água no solo. Essa relação é uma propriedade fundamental para descrever o processo dinâmico da água e de solutos no solo (WANG et al., 1998), bem como a disponibilidade de água para as plantas. Para a condição de cultivo (Figura 5), observa-se que, à medida que aumenta a profundidade, menor é a quantidade de água armazenada em cada tensão. Na condição de saturação, a maior quantidade de água armazenada foi no horizonte Ap, pois este apresentou maior porosidade total (Tabela 4). Até a tensão de 33 kPa, praticamente não houve alteração na quantidade de água retida em cada horizonte, fato atribuído,

principalmente, à baixa macroporosidade do solo em estudo, nos quais a água é fracamente retida e facilmente drenada em tensões menores que 33 kPa. Quando tensões maiores que 33 kPa foram aplicadas, ocorreu redução substancial na umidade até , a tensão de 300 kPa, a partir da qual não foram observadas diferenças expressivas na retenção de água entre os diferentes horizontes, fato devido, principalmente, pelas poucas diferenças na granulometria dos horizontes (Tabela 1). Em maiores tensões, a retenção da água no solo é comandada, principalmente, pelo teor de argila.

O horizonte Ap apresentou os maiores valores de conteúdo de água retidas nas amostras ao longo das tensões aplicadas, quando comparado aos demais horizontes. Nas menores tensões menores, a maior quantidade de água é função da maior macroporosidade. No entanto, a medida que maiores tensões foram aplicadas ao solo, a maior retenção é devida a maior quantidade de microporos desse horizonte. A microporosidade é responsável pela retenção e armazenamento, enquanto que a macroporosidade comanda a infiltração e a drenagem da água no solo (REICHERT et al., 2007).

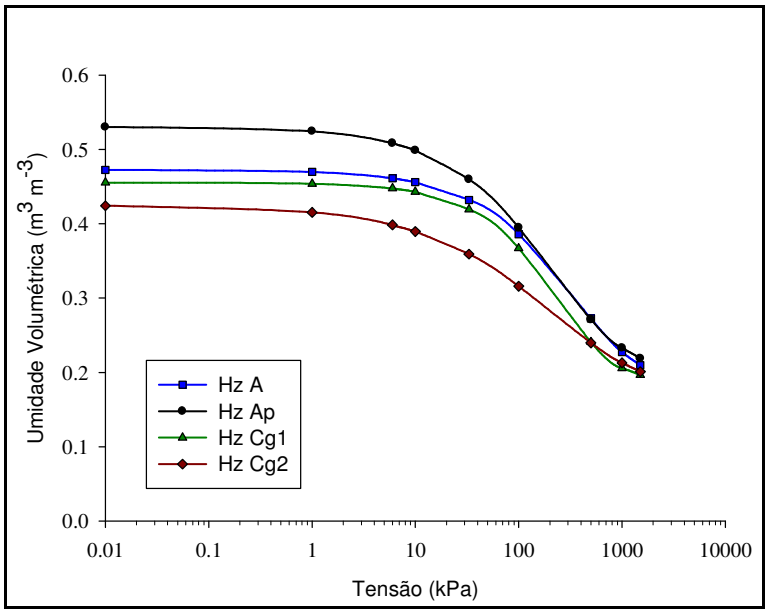

FIGURA 5 – Curva de retenção de água para o Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação.

Para o Gleissolo Háplico sem uso agrícola, o comportamento da curva de retenção de água (Figura 6) mostrou-se diferente em relação ao solo cultivado. O

horizonte superficial A1 apresentou a maior quantidade de água na saturação, sendo que essa, no entanto, não foi diferente estatisticamente do horizonte Cg2 (Tabela 4). Além disso, o horizonte Cg2 reteve mais água à medida que maiores tensões foram aplicadas ao solo, enquanto que o horizonte A1 reduziu rapidamente a água armazenada. Esses comportamentos são explicados pela elevada microporosidade do horizonte Cg2 e pela maior macroporosidade do horizonte A1, as quais, em ambos os casos, diferiam estatisticamente dos demais horizontes. Ao contrário da condição de cultivo, o solo sem uso agrícola apresentou diferenças quando maiores tensões foram aplicadas, sendo que o horizonte Cg2, com maior teor de argila, teve maior retenção, enquanto que o horizonte A1, menos argiloso, reteve menos água.

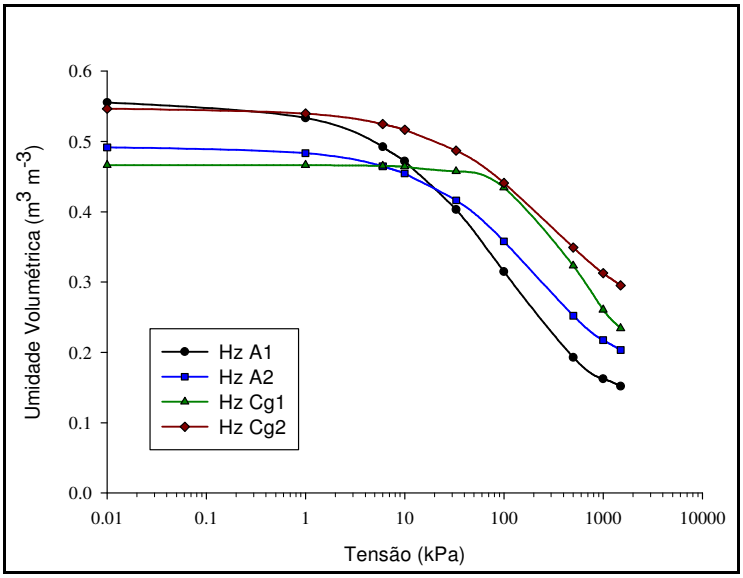

FIGURA 6 – Curva de retenção de água para o Gleissolo Háplico sem uso agrícola.

A quantificação da água disponível às plantas, situada entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, é necessária para o manejo da água do solo em agricultura irrigada, com reflexos nos cálculos da lâmina de água de irrigação (KLEIN et al., 2006). Não foram observadas diferenças significativas entre os diferentes usos para a variável água disponível (Tabela 5). Houve redução significativa na água disponível quando comparados os horizontes Ap e A em relação aos horizontes Cg1 e Cg2 na condição de cultivo. Essa redução pode estar relacionada com o aumento da densidade (Tabela 4) à medida que a profundidade aumentou, pois essa se relaciona diretamente com a porosidade total. Avaliando o

efeito de diferentes usos de um Latossolo Vermelho Distrófico na curva de retenção de água, Machado et al. (2008) observaram que o cultivo com culturas anuais sob o sistema de preparo convencional comprometeu a qualidade físico-hídrica quando comparado ao solo sob condições naturais (mata) e pousio, sendo que o solo sob mata apresentou maior retenção de água entre as tensões de 1 a 10 kPa e de 100 a 1500 kPa.

TABELA 5 – Água disponível (AD), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico.

Perfil*	Horizontes	Médias	Contraste	Estimativa	t	Pr > t
			AD (m m^{-3})			
GXc	Ap	0,261	GXc x GXs	-0,1033	-2,06	0,0558
	A	0,238	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,0867	2,45	0,0260
	Cg1	0,213	GXc[A x Ap]	-0,0200	-0,80	0,4364
	Cg2	0,199	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0133	0,53	0,6019
GXs	A1	0,290	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]	0,0567	1,60	0,1293
	A2	0,246	GXs[A1 x A2]	0,0433	1,73	0,1030
	Cg1	0,216	GXs[Cg1 x Cg2]	-0,0467	-1,86	0,0810
	Cg2	0,263	-	-	-	-

* os perfis representam as condições com (GXc) e sem (GXs) uso agrícola.

5.3.3 Fatores que afetam a compressibilidade do Gleissolo Háplico

Na Figura 7, estão expostos os gráficos das relações entre a pressão de preconsolidação e o grau de saturação inicial (Figura 7a), densidade do solo (Figura 7b), argila (Figura 7c), silte (Figura 7d), silte + argila (Figura 7e) e teor de carbono orgânico total (Figura 7f). A variável dependente pressão de preconsolidação não apresentou ajuste de equação significativo para nenhuma das variáveis citadas acima.

Com conhecimento da pressão de preconsolidação, pode-se monitorar o tipo de tráfego, de maquinário e o sistema a ser implantado em uma área agrícola (LIMA et al, 2006a). O teor de água constitui-se em um fator determinante na capacidade do solo em resistir à compactação por pisoteio animal ou tráfego de máquinas (SILVA et al., 2002a). A redução da pressão de preconsolidação com o aumento da umidade do solo foi observado por vários autores (IMHOFF, 2002; SILVA & CABEDA, 2006; SILVA et al., 2006a). Em um Argissolo Vermelho-Amarelo franco arenoso cultivado com cana-de-açúcar, Imhoff et al. (2001) observaram uma redução linear da pressão de preconsolidação com o aumento da umidade. O

aumento do teor de água, expresso pelo grau de saturação, ocasionou menores valores de pressão de preconsolidação em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e um Latossolo Vermelho distrófico típico, o que acarretou em deformações plásticas com pequenas pressões aplicadas ao solo (SILVA et al., 2002b).

O baixo conteúdo de água torna o solo mais resistente às deformações impostas por pressões externas em função da alta fricção entre suas partículas. Entretanto, com o incremento da umidade, as partículas do solo têm sua coesão e atrito reduzidos, pois a água age como um lubrificante e favorece o rearranjamento das partículas e, por consequência, reduz a capacidade do solo em suportar cargas (HILLEL, 1998; INHOFF, 2002; REICHERT et al., 2007).

Esse comportamento não foi observado no presente estudo (Figura 7a), devido à baixa variação da umidade nas amostras. Por meio das tensões aplicadas às amostras, esperava-se uma maior redução no grau de saturação, tal como se observa em solos bem drenados. No entanto, as tensões aplicadas não ocasionaram grandes diferenças na umidade, comportamento explicado pela alta capacidade de retenção de água do Gleissolo Háplico (Figuras 5 e 6). Nas tensões de 10 e 33 kPa, a umidade do solo estava acima do limite de liquidez, enquanto que na tensão de 100 kPa, somente nos horizontes superficiais e no horizonte Bg da condição de ausência de uso agrícola, a umidade estava entre o limite de liquidez e plasticidade. A condição de umidade recomendada para as práticas agrícolas está entre a o limite de coesão e de plasticidade, condição conhecida como ponto de friabilidade. No presente estudo, a umidade estava bastante acima dessa condição, sendo que várias operações na cultura do arroz irrigado são realizadas em condições semelhantes às avaliadas, como a aplicação de defensivos e a colheita.

De maneira geral, quanto mais denso é o solo, maior é a capacidade de suporte de carga para um mesmo teor de água. Em um Argissolo Amarelo Coeso latossólico de textura média/argilosa, Silva & Cabeda (2006) observaram que o maior grau de compactação proporcionou um empacotamento mais denso das partículas e, consequentemente, um maior número de pontos de contato entre elas, promovendo maior capacidade de suporte de carga. Em suas pesquisas, Imhoff et al. (2001), Imhoff (2002), Silva et al. (2002b) e Debiasi et al. (2008) também observaram incremento na capacidade de suporte com o aumento da densidade do solo.

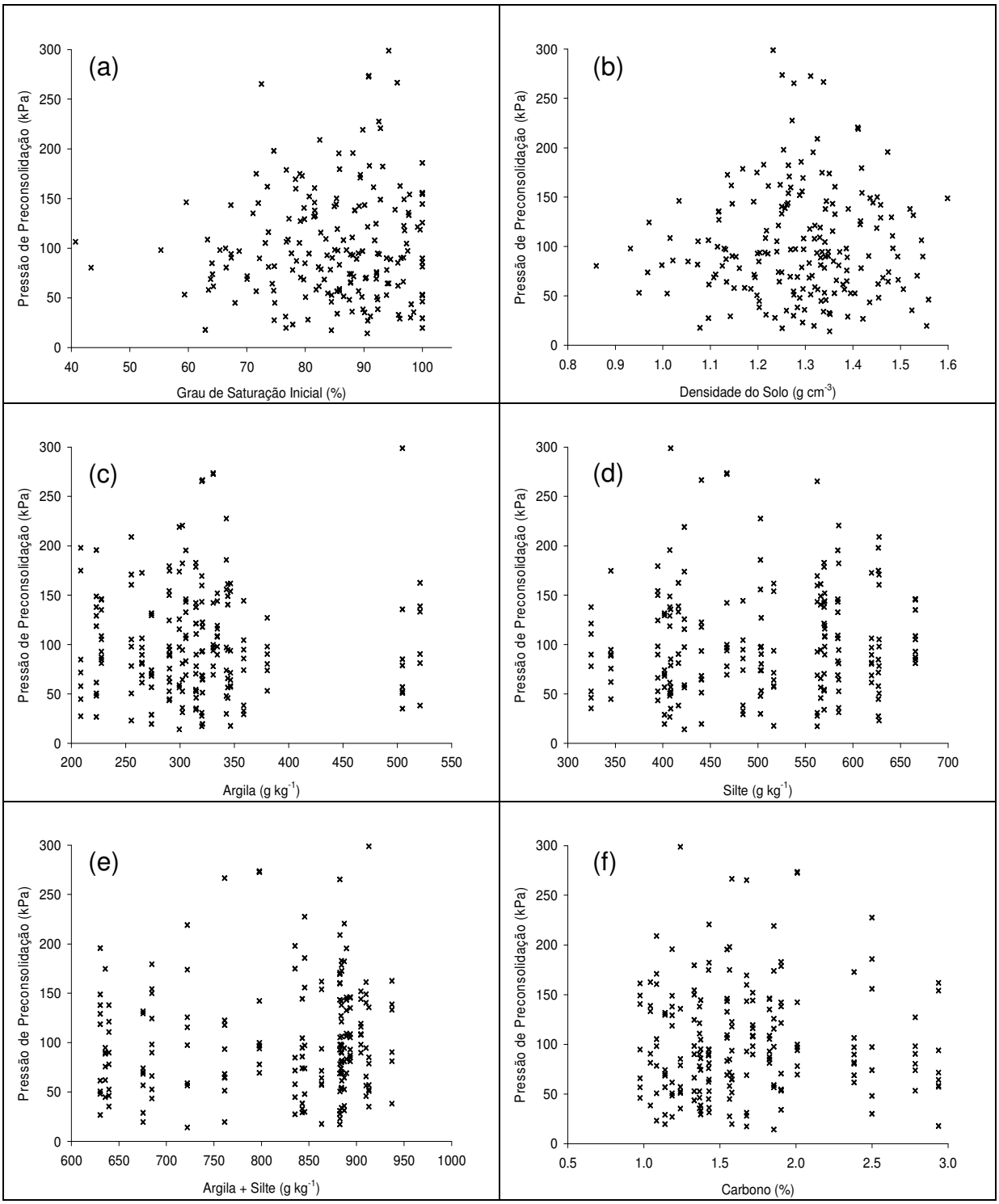

FIGURA 7 – Comportamento da pressão de preconsolidação em função do grau de saturação inicial (a), densidade do solo (b), teor de argila (c), teor de silte (d), teor de argila e silte (e) e teor de carbono (f) para o Gleissolo Háplico em diferentes usos.

O fato da pressão de preconsolidação não ter sido significativamente afetada pela elevação da densidade do solo (Figura 7b) pode ser explicado pela pouca variação obtida nos valores de densidade (CV = 4,71%, Tabela 4), além das reduzidas variações na porosidade total, especialmente em relação à macroporosidade, poros que são comprimidos quando um solo é compactado (REICHERT et al., 2007). Uma porosidade maior significa um menor número de pontos de contatos entre as partículas minerais (BRAIDA et al, 2010), o que pode reduzir a capacidade de suporte de carga. Em um Argissolo Vermelho distrófico arênico de textura franco arenosa, Lima et al. (2006a) também não observaram efeito da densidade do solo no parâmetro pressão de preconsolidação, fato relacionado ao reduzido grau de saturação das amostras (31-50%).

Cada solo apresenta um comportamento em relação ao tráfego de máquinas ou pisoteio animal (REICHERT et al., 2007). Segundo Horn & Lebert (1994), a uma mesma densidade 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. No entanto, a granulometria e o teor de carbono orgânico total não influenciaram a pressão de preconsolidação do solo em estudo (Figuras 7c, 7d, 7e, 7f). Avaliando a relação da pressão de preconsolidação com o teor de argila de vários solos do Rio Grande do Sul, Suzuki et al. (2008) observaram um aumento na capacidade de suporte de carga do solo com o acréscimo no teor de argila. Comportamento semelhante também foi observado por Imhoff et al. (2004) em Latossolos com ampla variação textural.

Nesses mesmos Latossolos, não foi observado efeito da matéria orgânica na pressão de preconsolidação (IMHOFF et al., 2004), enquanto que a adição de matéria orgânica extra, pela aplicação de cama de aviário, resultou na redução dos valores da pressão de preconsolidação em um Nitossolo Vermelho de textura muito Argilosa (VEIGA et al., 2008). Para Braida (2004), a matéria orgânica exerce dois efeitos contrários sobre a resistência do solo à compactação: um relacionado com o aumento da coesão entre as partículas minerais e outro com a mudança no arranjo das mesmas, com redução da densidade, sendo que no primeiro a capacidade de suporte de carga do solo aumenta, e no segundo diminui.

O conhecimento da susceptibilidade do solo à compactação tem importância na adequação de práticas de uso, manejo e tráfego de máquinas, com vistas à minimização do seu efeito sobre as propriedades do solo (SILVA et al., 2002b).

Ocorreram relações significativas entre o índice de compressão e o grau de saturação inicial, densidade, silte, silte + argila e carbono orgânico do solo. As equações obtidas para as relações significativas, juntamente com os coeficientes de determinação, encontram-se na Figura 8.

O índice de compressão relacionou-se com o grau de saturação inicial (R^2 = 0,4165) (Figura 8a). A suscetibilidade à compactação reduziu à medida que aumentou o grau de saturação. Esse comportamento se deve ao fato das amostras estarem, se não acima, próximos ao limite de liquidez (Tabela 2 e Figuras 5 e 6) nas três condições de tensão aplicadas. Essa condição é encontrada, muitas vezes, em solos irrigados por inundação como, por exemplo, nas colheitas, em que a água não é ou é parcialmente drenada. O excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e, dessa forma, deformações ocorrem apenas com a expulsão da água do meio poroso (BRAIDA et al., 2010). Como o solo nessas condições encontra-se praticamente saturado, acaba comportando-se como um fluido, o que evita maiores deformações.

Os maiores valores do índice de compressão de um Argissolo Amarelo Coeso latossólico de textura média/argilosa ocorreram com maiores conteúdos de água (SILVA & CABEDA, 2006). No entanto, Imhoff et al. (2004), em Latossolos com ampla variação textural, não observaram relações significativas entre essas propriedades, enquanto que Silva et al. (2002a) observaram que o índice de compressão foi pouco influenciado pelo grau de saturação. Em geral, a relação entre o índice de compressão e o conteúdo de água no solo é quadrática, pois ocorre uma umidade em que a compressibilidade é máxima. Isso ocorre porque, à medida que o solo vai umedecendo, a compressibilidade cresce, pois a água reduz a coesão e o atrito entre as partículas. Porém, após atingir um valor máximo, a compressibilidade decresce, pois o excesso de água permite o surgimento de pressões neutras e dessa forma, a deformação ocorre apenas com a expulsão da água do meio poroso (BRAIDA et al., 2010).

O índice de compressão reduziu com o aumento na densidade do solo (R^2 = 0,6917) (Figura 8b). Outras pesquisas também observaram esse comportamento (SILVA et al., 2000c; SILVA et al., 2002b; BRAIDA, 2004; LIMA et al., 2006a; SILVA & CABEDA, 2006). Em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, Debiasi et al. (2008) observaram que o índice de compressão diminuiu linearmente à medida que a densidade elevou, obtendo um R^2 de 0,79. Em Latossolos e Argissolos do Rio

Grande do Sul, Suzuki et al. (2008) observaram que, quanto maior a densidade inicial do solo, menor sua susceptibilidade à compactação (R^2 = 0,77). Para esses autores, a menor susceptibilidade à compactação pode estar associada ao elevado estado de compactação, o qual resulta em menores deformações quando altas pressões são aplicadas, devido ao aumento do número de pontos de contato entre as partículas e os agregados do solo, o que dificulta a movimentação relativa das mesmas (IMHOFF, 2002).

Estudos mostram que o teor de argila afeta os parâmetros compressivos do solo, pois o seu incremento ocasiona um aumento no índice de compressão (IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al 2008). Solos argilosos são capazes de suportar maiores pressões, porém são mais susceptíveis à compactação, fato que pode estar associado à capacidade desses em manter maior umidade a maiores tensões (SUZUKI et al., 2008). No entanto, esse comportamento não foi observado no solo em estudo (Figura 8c). Contudo, o teor de silte (Figura 8d) e esse somado ao teor de argila (Figura 8e) apresentaram relação significativa, ainda que baixos, com o índice de compressão, apresentando coeficientes de determinação de 0,1815 e 0,1071, respectivamente. Mineralógica e fisicamente, as partículas de silte geralmente parecem-se com partículas de areia, mas, visto que elas são menores e possuem uma maior área superficial por unidade de massa e são frequentemente revestidas com argila fortemente aderida, exibem, em um limitado grau, alguns atributos físico-químicos semelhantes à argila (HILLEL, 1998), fato que explica os baixos valores de coeficiente de determinação observados.

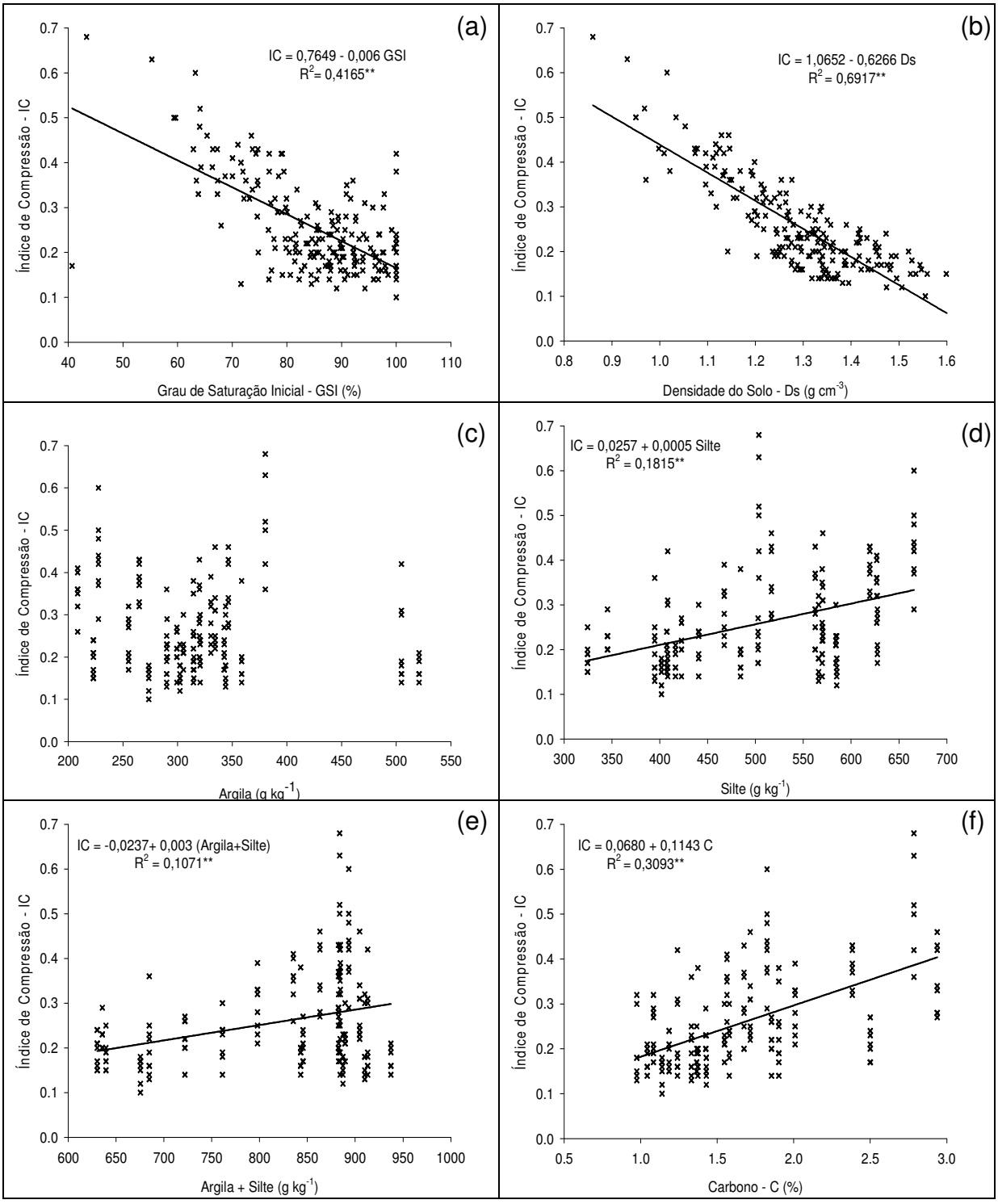

FIGURA 8 – Comportamento do índice de compressão em função do grau de saturação inicial (a), densidade do solo (b), teor de argila (c), teor de silte (d), teor de argila e silte (e) e teor de carbono (f) para o Gleissolo Háplico em diferentes usos. ** mostram que o modelo ajustado é significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste F.

O índice de compressão apresentou relação significativa e positiva com teor de carbono orgânico do solo (R^2 = 0,3093) (Figura 8f). À medida que aumentou o teor de carbono, a suscetibilidade à compactação também se elevou. Em um Nitossolo Vermelho muito argiloso, a adição de matéria orgânica (cama de aviário) resultou em um aumento no índice de compressão (VEIGA et al., 2007), enquanto que Arvidsson (1998) observou que o esse não foi afetado pelo teor de carbono orgânico do solo. No entanto, segundo Braida et al. (2008), o aumento da matéria orgânica e a presença de resíduos culturais proporcionam elasticidade ao solo, o que reduz a suscetibilidade à compactação. Como discutido anteriormente, o incremento no teor de matéria orgânica pode causar efeitos contrários na compressibilidade do solo. Para a condição em estudo, o teor de carbono orgânico aumentou os riscos à compactação, pois reduziu a densidade, visto que os maiores valores de carbono orgânico total (Tabela 3) e de densidade do solo (Tabela 4) ocorreram nos horizontes superficiais.

A partir das relações observadas, obteve-se uma equação de regressão múltipla, pelo método "Stepwise Forward", para estimar os valores do índice de compressão. Para a pressão de preconsolidação, nenhuma equação foi obtida, já que nenhuma variável independente apresentou relação com esse parâmetro. A variável densidade do solo explicou 69,17% (R^2 parcial = 0,6917) dos valores de índice de compressão, o grau de saturação inicial explicou 6,63% (R^2 parcial = 0,0663), a soma dos teores de silte e argila explicaram 2,64% (R^2 parcial = 0,0264) e o teor de carbono orgânico explicou 0,76% (R^2 parcial = 0,0076), sendo todas variáveis significativas a 1% de probabilidade de erro (Tabela 6). Considerando essas variáveis, a equação de regressão múltipla obtida foi: IC = 1,3230 - 0,0026 GSI - 0,5582 Ds - 0,0002 (Argila+Silte) + 0,0214 C (R^2 = 0,7919). O R^2 parcial significa quanto cada variável contribuiu para a precisão do modelo, enquanto que o R^2 do modelo é a precisão total obtida pelo modelo.

TABELA 6 – Coeficientes, coeficiente de determinação parcial e do modelo, valor de F e significância das variáveis que estimam o índice de compressão do Gleissolo Háplico.

Passo	Variável	Coeficiente	R^2 Parcial	R^2 do Modelo	F	Pr>F
1	Intercepto	1,3230	-	-		<0,0001
2	Ds	-0,5582	0,6917	0,6917	426,31	<0,0001
3	GSI	-0,0026	0,0663	0,7580	51,77	<0,0001
4	Argila+Silte	-0,0002	0,0264	0,7844	22,98	<0,0001
5	C	0,0214	0,0076	0,7919	6,80	0,0098
6	Argila	-0,0001	0,0060	0,7979	5,48	0,0203
7	Silte	-0,0036	0,0006	0,7985	0,53	0,4656

5.3.4 Curva de compressibilidade do solo

Nas Tabelas 7, 8 e 9 estão dispostos os valores de pressão de preconsolidação, índice de compressão, grau de saturação, juntamente com os contrastes, a estimativa dos contrastes, o valor t e a significância dos contrastes avaliados para as amostras homogeneizadas quanto ao conteúdo de água nas tensões de 10 kPa, 33 kPa e 100 kPa, respectivamente.

É importante conhecer os níveis de pressões que o solo suportou no passado e a umidade do solo no momento das operações agrícolas para que a compactação adicional seja evitada (DIAS JUNIOR & PEIRCE, 1996). A pressão de preconsolidação é a pressão máxima que pode ser aplicada ao solo sem que o processo de compactação ocorra. O índice de compressão indica a suscetibilidade à compactação. Os fatores citados, geralmente, são influenciados pela densidade (SILVA et al., 2002b), teor de água (SILVA et al., 2002a), argila (IMHOFF et al., 2004) e matéria orgânica do solo (BRAIDA et al., 2010).

De acordo com Debiasi et al. (2008), para um mesmo solo, a relação entre a pressão de preconsolidação e a densidade do solo é positiva, ou seja, menores valores de densidade estão associados à menor capacidade de suporte de carga. Apesar de terem ocorrido diferenças significativas nos valores de densidade do solo (Tabela 4), diferenças significativas na pressão de preconsolidação para o contraste GXc x GXs não aconteceram (Tabela 7, 8, 9). Como já discutido anteriormente, a

pressão de preconsolidação no Gleissolo Háplico em estudo não foi influenciada pela densidade (Figura 7b). Acrescenta-se a isso, o alto grau de saturação das amostras, as quais estavam acima do limite de liquidez (Tabela 2 e Figuras 5 e 6), e as baixas porosidades, fatores que podem ter influenciado as poucas diferenças observadas na capacidade de suporte de carga.

TABELA 7 – Pressão de preconsolidação (σp), índice de compressão (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico com amostras equilibradas na tensão de 10 kPa.

Perfil*	Horizontes	Médias	Contraste	Estimativa	t	Pr > t
			σp (kPa)			
GXc	Ap	105,0	GXc x GXs	15,1667	0,20	0,8407
	A	112,9	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	35,4433	0,68	0,5091
	Cg1	110,8	GXc[A x Ap]	7,8533	0,21	0,8351
	Cg2	71,7	GXc[Cg1 x Cg2]	39,1233	1,05	0,3075
GXs	A1	91,6	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	-5,0367	-0,10	0,9247
	A2	98,5	GXs[A1 x A2]	-6,8567	-0,18	0,8557
	Cg1	116,9	GXs[Cg1 x Cg2]	38,6867	1,04	0,3127
	Cg2	78,2	-	-	-	-
			IC			
GXc	Ap	0,33	GXc x GXs	-0,1500	-1,46	0,1634
	A	0,23	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,1633	2,25	0,0389
	Cg1	0,21	GXc[A x Ap]	-0,1000	-1,95	0,0692
	Cg2	0,18	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0367	0,71	0,4854
GXs	A1	0,38	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	0,1667	2,30	0,0356
	A2	0,25	GXs[A1 x A2]	0,1367	2,66	0,0171
	Cg1	0,23	GXs[Cg1 x Cg2]	0,0033	0,06	0,9490
	Cg2	0,23	-	-	-	-
			GS (%)			
GXc	Ap	86,59	GXc x GXs	18,0967	1,71	0,1059
	A	91,70	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	-11,8400	-1,59	0,1324
	Cg1	93,93	GXc[A x Ap]	5,1100	0,97	0,3475
	Cg2	96,20	GXc[Cg1 x Cg2]	-2,2700	-0,43	0,6730
GXs	A1	77,38	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	-25,2700	-3,38	0,0038
	A2	85,14	GXs[A1 x A2]	-7,7600	-1,47	0,1610
	Cg1	90,88	GXs[Cg1 x Cg2]	-6,0367	-1,14	0,2697
	Cg2	96,91	-	-	-	-

* os perfis representam as condições com (GXc) e sem (GXs) uso agrícola.

Quando as amostras foram equilibradas na tensão de 33 kPa (Tabela 8), houveram diferenças estatísticas no contraste GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)] para a variável pressão de preconsolidação. Os horizontes Ap e A apresentaram os

maiores valores quando comparados aos horizontes Cg1 e Cg2. Para as amostras equilibradas na tensão de 100 kPa (Tabela 9), ocorrem diferenças para o contraste GXc[A x Ap], sendo que os valores de pressão de preconsolidação foram maior no horizonte A em relação ao horizonte Ap. Nessa condição, as amostras também estavam com a umidade acima do limite de liquidez (Figuras 5 e 6 e Tabela 2). Apesar da pressão de preconsolidação não ter sido influenciada pela umidade no solo em estudo (Figura 7a), este parece ser o fator que contribuiu para a maior capacidade de suporte dos horizontes superficiais, pois estes apresentaram uma saturação média inferior aos horizontes mais profundos. De maneira geral, observa-se que a pressão de preconsolidação se torna maior à medida que o solo se torna mais seco.

Não houve diferença significativa no contraste que compara as duas condições de uso (GXc x GXs) para a variável índice de compressão (Tabela 7, 8, 9). Nas duas condições de uso (contrastes GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)] e GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]), os horizontes superficiais (Ap e A, A1 e A2) apresentaram os maiores valores de índice de compressão, diferindo estatisticamente dos demais horizontes (Cg1 e Cg2) nas três condições de umidade avaliadas (Tabela 7, 8 e 9). Houve diferença significativa no contraste GXs[A1 x A2] para as amostras equilibradas na tensão de 10 kPa e no contraste GXc[A x Ap] para as amostras equilibradas na tensão de 33 kPa, sendo que a suscetibilidade à compactação foi maior nos horizontes superficiais. Como observado na Figura 8b, quanto maior a densidade inicial do solo, menor à suscetibilidade a compactação. Os horizontes superficiais apresentaram a menor densidade, o que explica o comportamento descrito, além de maior macroporosidade quando comparado aos demais horizontes, já que são os macroporos que são reduzidos quando um solo é compactado (REICHERT et al., 2007). Outro fator que deve ser considerado é o teor de carbono orgânico do solo, sendo que os maiores valores ocorreram nos horizontes superficiais, tendo em vista que o índice de compressão aumenta com o teor de carbono (Figura 8f).

O grau de saturação foi maior e significativo nos horizontes mais profundos nas três condições de umidade impostas às amostras para o contraste GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2), sendo que esses apresentaram os maiores valores e os horizontes superficiais estavam menos saturados. Esse comportamento se deve à maior macroporosidade dos horizontes superficiais que, após a aplicação das tensões, drenaram mais água quando comparados aos horizontes mais profundos (Figuras 5

e 6). Isso também explica o maior índice de compressão observado nos horizontes superficiais (Tabelas 7, 8 e 9), pois, como consta na Figura 8a, a suscetibilidade do solo reduziu à medida que a umidade aumentou, devido ao surgimento de pressões neutras, evitando que maiores deformações ocorressem.

Na Figura 9, estão ilustradas as curvas de compressão normalizadas. Na condição de uso agrícola (Figura 9a), o horizonte Ap apresentou maiores deformações ao longo das cargas aplicadas, sendo que diferenças mais marcantes entre os horizontes foram observadas quando pressões de aproximadamente 200 kPa foram aplicadas ao solo. Essa maior deformação é devido à menor densidade e à maior macroporosidade desse horizonte superficial, visto que ele é submetido anualmente à ação de implementos agrícolas para o preparo do solo, enquanto que os demais horizontes são naturalmente mais densos e com menor quantidade de poros. Os horizontes A, Cg1 e Cg2 apresentaram o mesmo comportamento ao longo da curva de compressão, observando suas semelhanças quanto às suas características físicas (Tabela 4) pela reduzida influência dos processos pedogenéticos.

No solo não cultivado (Figura 9b) assim como na condição de cultivo, as deformações foram maiores no horizonte superficial (A1) e reduziram nos horizontes subseqüentes. No entanto, maiores diferenças no comportamento compressivo dos horizontes ocorreram quando cargas de aproximadamente 100 kPa foram aplicadas ao solo. A partir desse momento, reduções no índice de vazios foram maiores no horizonte A1, devido à sua menor densidade e maior macroporosidade. No horizonte A2, ocorreram menores reduções no índice de vazios, enquanto que os horizontes Cg1 e Cg2 apresentaram as menores reduções com comportamento compressivo parecido, devido às suas semelhanças físicas, principalmente em relação à macroporosidade. A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total, especialmente a macroporosidade, indicando que, quanto maiores os valores de deformação, maiores serão as reduções na macroporosidade e porosidade total do solo (SILVA et al., 2000c).

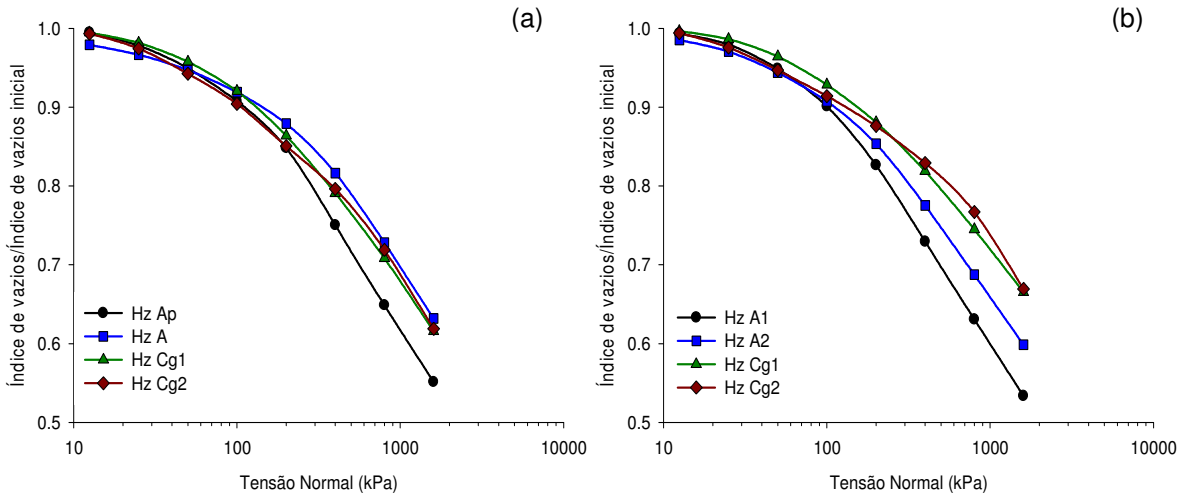

FIGURA 9 – Curva de compressão do solo normalizada para as amostras equilibradas na tensão de 10 kPa nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b).

As curvas de compressão normalizadas das amostras equilibradas na tensão de 33 kPa estão ilustradas na Figura 10. Na condição de uso agrícola do solo (Figura 10a), o comportamento compressivo dos horizontes foi semelhante ao observado quando as amostras foram equilibradas quanto a sua umidade na tensão de 10 kPa (Figura 9a), porém observou-se que a redução nos índices de vazios foi superior, fato associado à menor quantidade de água nas amostras, o que fez com que o solo pudesse sofrer maiores deformações. O horizonte Ap sofreu maiores deformações, sendo que as maiores diferenças na curva de compressão ocorreram quando a pressão de aproximadamente 200 kPa foi aplicada. No solo mantido sem uso agrícola (Figura 10b), o comportamento também foi semelhante ao observado quando as amostras foram equilibradas na tensão de 10 kPa (Figura 9b) com a diferença de que a intensidade de redução no índice de vazios foi superior a observada nessa tensão, fato novamente associado ao menor teor de água contida nas amostras.

TABELA 8 – Pressão de preconsolidação (σp), índice de compressão (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico com amostras equilibradas na tensão de 33 kPa.

Perfil*	Horizontes	Médias	Contraste	Estimativa	t	Pr > t
			σp (kPa)			
GXc	Ap	145,1	GXc x GXs	49,3500	0,84	0,4106
	A	103,0	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	103,1767	2,50	0,0238
	Cg1	74,0	GXc[A x Ap]	-42,0900	-1,44	0,1688
	Cg2	70,9	GXc[Cg1 x Cg2]	3,0800	0,11	0,9173
GXs	A1	102,4	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	85,6067	2,07	0,0547
	A2	112,2	GXs[A1 x A2]	-9,7833	-0,34	0,7420
	Cg1	75,7	GXs[Cg1 x Cg2]	22,4100	0,77	0,4540
	Cg2	53,3	-	-	-	-
			IC			
GXc	Ap	0,42	GXc x GXs	0,0467	0,37	0,7149
	A	0,24	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,2900	3,27	0,0048
	Cg1	0,20	GXc[A x Ap]	-0,1767	-2,81	0,0125
	Cg2	0,18	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0200	0,32	0,7541
GXs	A1	0,39	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)]	0,3367	3,79	0,0016
	A2	0,28	GXs[A1 x A2]	0,1033	1,65	0,1192
	Cg1	0,17	GXs[Cg1 x Cg2]	0,0067	0,11	0,9167
	Cg2	0,16	-	-	-	-
			GS (%)			
GXc	Ap	73,97	GXc x GXs	16,0833	1,28	0,2200
	A	85,44	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	-16,0933	-1,81	0,0897
	Cg1	84,10	GXc[A x Ap]	11,4633	1,82	0,0876
	Cg2	91,40	GXc[Cg1 x Cg2]	-7,2967	-1,16	0,2638
GXs	A1	68,40	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	-24,9633	-2,80	0,0128
	A2	78,53	GXs[A1 x A2]	-10,1333	-1,61	0,1273
	Cg1	82,51	GXs[Cg1 x Cg2]	-6,8767	-1,09	0,2912
	Cg2	89,39	-	-	-	-

* os perfis representam as condições com (GXc) e sem (GXs) uso agrícola.

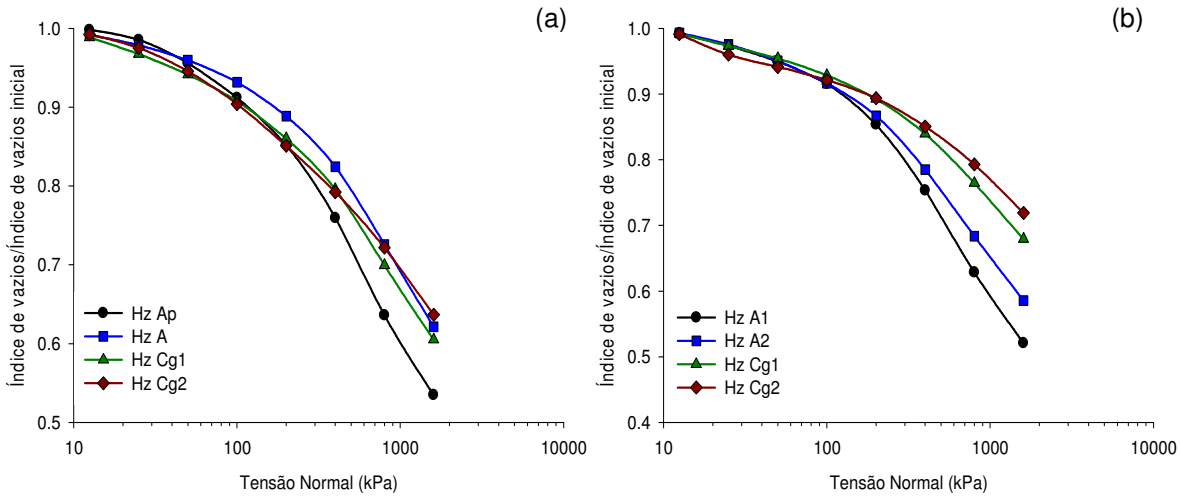

FIGURA 10 – Curva de compressão do solo normalizada para as amostras equilibradas na tensão de 33 kPa nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b).

O comportamento compressivo das amostras de solo homogeneizadas quanto a sua umidade na tensão de 100 kPa está ilustrado na Figura 11. Novamente, o comportamento observado na condição de uso do solo (Figura 11a) foi semelhante aos demais comportamentos já discutidos (Figuras 9a e 10a), porém com reduções no índice de vazios, ocorrendo em maiores intensidades. No solo mantido sem uso agrícola (Figura 11b), menores reduções no índice de vazios ocorreram em função da maior pressão de preconsolidação nessa condição de umidade. Além disso, ao contrário do comportamento observado anteriormente, nessa tensão, foi o horizonte A2 que apresentou as maiores reduções no índice de vazios.

TABELA 9 – Pressão de preconsolidação (σp), índice de compressão (IC), grau de saturação (GS), contrastes avaliados, estimativa dos contrastes, valor t e significância dos contrastes do Gleissolo Háplico com amostras equilibradas na tensão de 100 kPa.

Perfil*	Horizontes	Médias	Contraste	Estimativa	t	Pr > t
			σp (kPa)			
GXc	Ap	68,40	GXc x GXs	-82,0800	-2,05	0,0571
	A	118,07	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	-30,2000	-1,07	0,3020
	Cg1	104,17	GXc[A x Ap]	49,6633	2,48	0,0246
	Cg2	112,49	GXc[Cg1 x Cg2]	-8,3167	-0,42	0,6834
GXs	A1	107,5	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	-20,9133	-0,74	0,4708
	A2	124,6	GXs[A1 x A2]	-17,0666	-0,85	0,4065
	Cg1	122,7	GXs[Cg1 x Cg2]	-7,7000	-0,38	0,7056
	Cg2	130,4	-	-	-	-
			IC			
GXc	Ap	0,37	GXc x GXs	-0,0567	-0,47	0,6480
	A	0,26	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	0,2233	2,59	0,0196
	Cg1	0,22	GXc[A x Ap]	-0,1100	-1,81	0,0897
	Cg2	0,18	GXc[Cg1 x Cg2]	0,0400	0,66	0,5206
GXs	A1	0,40	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	0,3067	3,56	0,0026
	A2	0,29	GXs[A1 x A2]	0,1067	1,75	0,0990
	Cg1	0,18	GXs[Cg1 x Cg2]	-0,0200	-0,33	0,7468
	Cg2	0,21	-	-	-	-
			GS (%)			
GXc	Ap	73,11	GXc x GXs	4,9067	0,37	0,7165
	A	83,11	GXc[(Ap,A) x (Cg1,Cg2)]	-16,1200	-1,72	0,1052
	Cg1	85,32	GXc[A x Ap]	9,9967	1,51	0,1516
	Cg2	87,02	GXc[Cg1 x Cg2]	-1,7033	-0,26	0,8008
GXs	A1	67,79	GXs[(A1,A2) x (Cg1,Cg2)	-32,4267	-3,45	0,0033
	A2	77,83	GXs[A1 x A2]	-10,0367	-1,51	0,1500
	Cg1	82,92	GXs[Cg1 x Cg2]	-12,1900	-1,84	0,0850
	Cg2	95,12	-	-	-	-

* os perfis representam as condições com (GXc) e sem (GXs) uso agrícola.

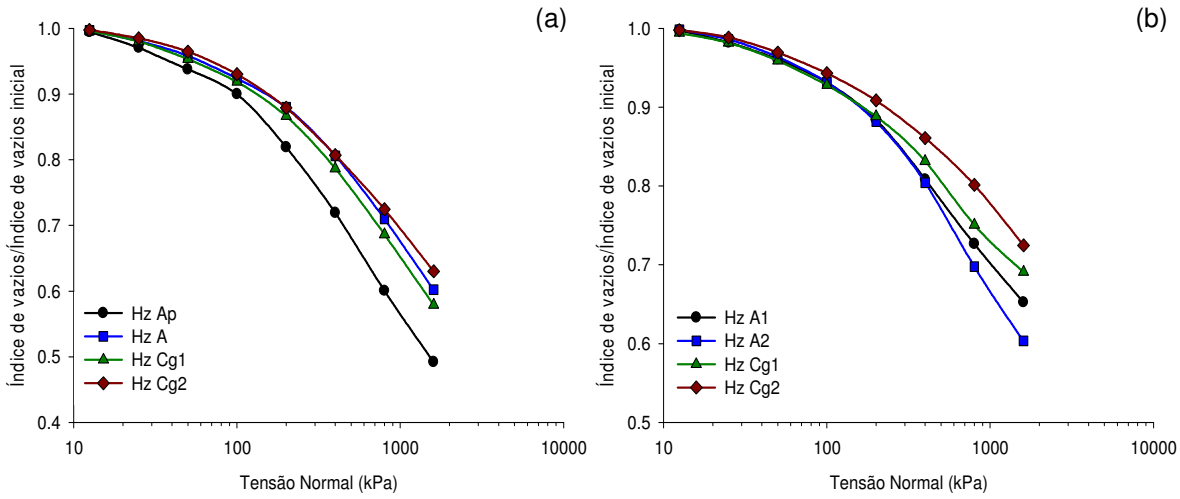

FIGURA 11 – Curva de compressão do solo normalizada para as amostras equilibradas na tensão de 100 kPa nos diferentes horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b).

Diferenças significativas entre as variáveis pressão de preconsolidação e índice de compressão não foram observadas nas amostras equilibradas nas três tensões em estudo, quando comparadas às duas condições de uso do solo. Porém, considerando a capacidade de suporte de carga, o solo cultivado mostrou-se mais resistente, porque ocorreram menores reduções no índice de vazios quando pressões maiores foram aplicadas, comparado ao solo sem uso agrícola. Essas diferenças devem-se principalmente ao aumento na densidade do solo com o uso agrícola, o que evidencia os efeitos do tráfego de máquinas e do manejo no comportamento físico-mecânico do Gleissolo Háplico. Comparando o uso de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa em diferentes sistemas de manejo mantido em condições naturais, Oliveira et al. (2003) observaram que o uso do solo reduziu o índice de compressão na camada superficial do solo quando as amostras foram equilibradas na tensões de 6 kPa, enquanto que nas demais tensões diferenças não foram observadas. Tal comportamento foi atribuído à maior deformação do solo sem cultivo para o conteúdo de água mais elevado, o que está relacionado com sua menor densidade e com o maior espaço poroso disponível à deformação. Em um Nitossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa, menores valores de pressão de preconsolidação ocorreram nos tratamentos sob condição natural (mata nativa) e sob semeadura direta há 12 anos, fato relacionado

à melhor qualidade estrutural do solo nessas duas condições (ASSIS & LANÇAS, 2005).

O comportamento da pressão de preconsolidação em cada horizonte de acordo com a umidade do solo para as condições de cultivo e ausência de uso agrícola está ilustrado, respectivamente, nas Figuras 12a e 12b. Não ocorreram diferenças significativas para a pressão de preconsolidação nos horizontes avaliados, exceto o horizonte Cg2 da condição de ausência de uso do solo (Figura 12b), em que as amostras equilibradas na tensão de 300 kPa apresentaram os maiores valores, porém, sem serem diferentes estatisticamente das amostras equilibradas na tensão de 10 kPa, que por sua vez foram iguais aos valores obtidos na tensão de 33 kPa.

Apesar da pressão de preconsolidação não ter relação com o grau de saturação das amostras (Figura 7a), esse resultado pode ser explicado pelo elevado grau de saturação das amostras equilibradas na tensão de 100 kPa (95,12%), inferior ao grau de saturação das amostras a 10 kPa (96,91%), porém superior ao grau de saturação das amostras equilibradas a 33 kPa (89,39%), o que fez com que a capacidade de suporte de carga fosse maior, enquanto que na tensão de 33 kPa, maiores espaços livres (sem água) existiam, o que ocasionou uma maior deformação. No entanto, esse comportamento é controverso, pois na tensão de 100 kPa, as amostras deveriam apresentar um menor grau de saturação em relação a tensão de 33 kPa (Figura 6).

O índice de compressão relacionou-se significativamente com o grau de saturação inicial (Figura 8a). Porém, quando comparados os horizontes das duas condições de uso do solo, diferenças significativas entre as amostras equilibradas nas tensões de 10 kPa, 33 kPa e 100 kPa não ocorreram (Figuras 13a,b) . Tal fato pode ser relacionado a pouca variação no grau de saturação ocorrido em cada horizonte. Observa-se que a suscetibilidade à compactação reduziu à medida que aumentou a profundidade, fato relacionado ao aumento da densidade ao longo dos horizontes, pois à medida que aumenta a densidade do solo, ocorre uma redução no índice de compressão (Figura 8b).

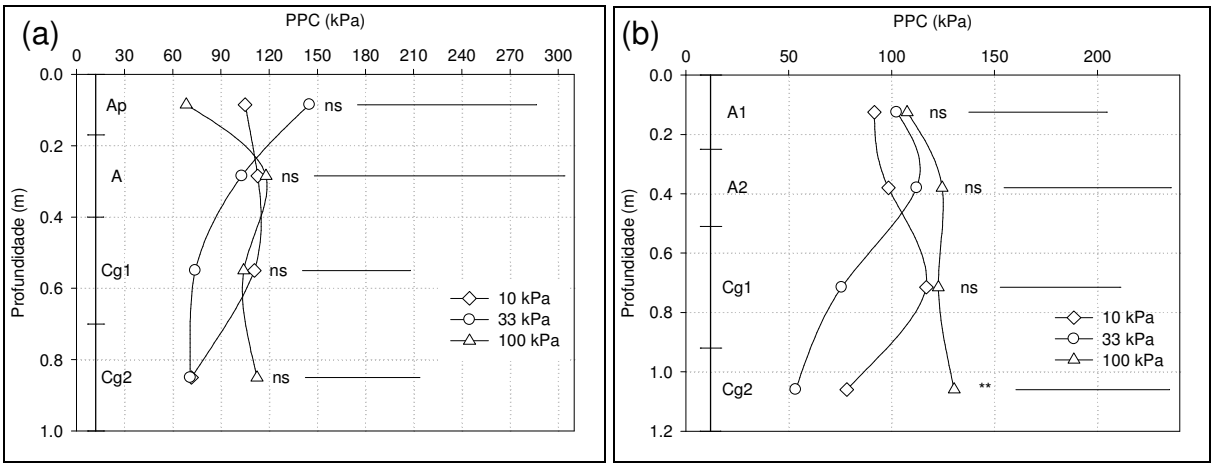

FIGURA 12 – Pressão de preconsolidação (PPC) dos horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b) em diferentes tensões aplicadas nas amostras. Barras horizontais representam a DMS calculado pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

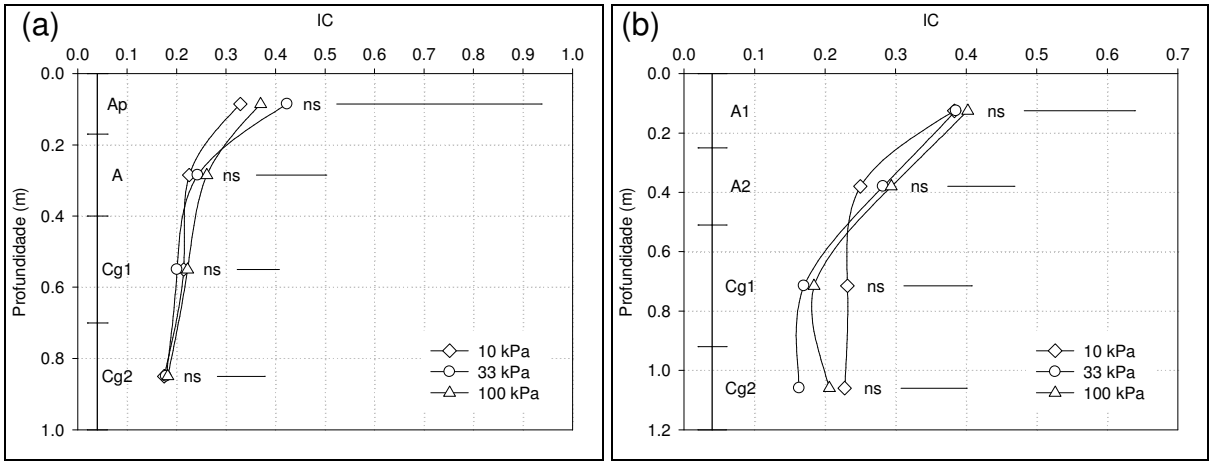

FIGURA 13 – Índice de compressão (IC) dos horizontes do Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado por inundação (a) e sem uso agrícola (b) em diferentes tensões aplicadas nas amostras. Barras horizontais representam a DMS calculado pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

5.4 Conclusões

O uso agrícola afetou a qualidade física do Gleissolo Háplico em estudo, elevando os valores de densidade e reduzindo os valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade quando comparado ao tratamento mantido sem uso agrícola. No entanto, o uso agrícola não afetou a disponibilidade de água do Gleissolo Háplico em estudo.

O índice de compressão foi significativamente influenciado pela densidade do solo, grau de saturação inicial, teor de silte, teor de silte + argila e teor de carbono orgânico total. O índice de compressão reduziu com o aumento da densidade e do grau de saturação, enquanto que o incremento no teor de silte, silte somado ao teor de argila, além do carbono orgânico do solo elevaram o índice de compressão.

A pressão de preconsolidação não foi afetada significativamente pelos atributos do solo avaliados.

A equação de regressão múltipla obtida para o índice de compressão foi: IC = 1,3230 - 0,0026 GSI - 0,5582 Ds - 0,0002 (Argila+Silte) + 0,0214 C (R2 = 0,7919).

O uso do solo com cultivo de arroz irrigado não alterou a pressão de preconsolidação e o índice de compressão quando comparado à condição de ausência de uso agrícola.

A umidade do solo não afetou a pressão de preconsolidação e o índice de compressão em cada horizonte.

6 CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E MECÂNICAS E DEMANDA ENERGÉTICA SOLICITADA PELA HASTE ESCARIFICADORA EM ARGISSOLO SOB COMPACTAÇÃO ADICIONAL

6.1 Introdução

O sistema de semeadura direta tem contribuído significativamente na redução da degradação do solo, principalmente aquela relacionada aos processos erosivos, devido à ausência de revolvimento e à contínua deposição de resíduos vegetais em superfície. Porém, com o passar dos anos, alterações estruturais têm sido identificadas em solos cultivados sob esse sistema. Dados publicados e observações visuais indicam que solos sob semeadura direta têm apresentado problemas de compactação subsuperficial, a qual ocorre entre 8 cm e 15 cm de profundidade (REINERT et al., 2008; SECCO et al., 2009), e foi denominada por Reichert et al. (2009a) de pé-de-plantio direto.

Vários são os fatores que causam esse efeito ao solo, os quais abrangem características inerentes às maquinas agrícolas, ao sistema de manejo e às condições do solo (SOANE & OUWERKERK, 1994; HÅKANSSON & MEDVEDEV, 1995; TORMENA & ROLLOF, 1996; RICHART et al., 2005; HÅKANSSON, 2005; LIMA et al., 2006a; REICHERT et al., 2007). Além disso, várias são as consequências da compactação. Porém, o grau e a intensidade dessas consequências varia de acordo com o tipo de solo (REICHERT et al, 2007) e, principalmente, a condição hídrica desse (GUBIANI, 2008). Segundo Klein et al. (2008), em condições de deficiência hídrica, acentuam-se os problemas relacionados ao impedimento do crescimento do sistema radicular, enquanto que, em condições de excesso de precipitação, problemas relacionados à deficiência na aeração do solo podem ocorrer.

De maneira geral, as consequências da compactação são negativas, pois esta prejudica a estrutura do solo, ocasionando problemas no estabelecimento, desenvolvimento e produtividade das culturas (IMHOFF, 2002), além de implicar em maiores riscos ao ambiente, o que impacta negativamente no meio rural, com

repercussões no meio urbano (REICHERT et al., 2003). Em relação às maquinas e implementos agrícolas, a compactação também age de forma negativa. Trabalhos têm observado aumento na energia de tração solicitada às máquinas agrícolas em função da compactação do solo (SANCHEZ-GIRON et al. 2005; CONTE et al. 2007; ROSA et al., 2008a).

Para redução ou alívio dos efeitos da compactação, a escarificação esporádica tem se apresentado como uma alternativa viável (CAMARA & KLEIN, 2005a; ROSA et al., 2008a), pois afeta positivamente as propriedades físicas, hídricas e mecânicas do solo (CAMARA & KLEIN, 2005b; KLEIN et al., 2008; COLLARES et al., 2008). Contudo, a ação da ponteira dos escarificadores pode causar compactação abaixo de sua linha de atuação, e formar o chamado "pé-de-arado" que, dependendo de sua grandeza, pode impedir o aprofundamento do sistema radicular e também diminuir a infiltração de água no solo (ROSA, 2007). O pé-de-arado é facilmente encontrado em solos cultivados no sistema convencional. No entanto, o seu estudo em solos cultivados sob o sistema de semeadura direta e que foram escarificados é restrita em nível mundial (ROSA, 2007), porém de grande importância para a conservação do solo e da água em lavouras cultivadas sob SSD que apresentam elevado grau de compactação.

Este trabalho teve por objetivos avaliar o efeito da compactação nos atributos físico-hídricos e mecânicos e na demanda energética solicitada pela haste escarificadora e analisar o comportamento das propriedades físico-hídricas e mecânicas abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Local e solo

O trabalho foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maira, localizada no município de Santa Maria, situada na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul. A área está delimitada entre as coordenadas geográficas 29º 43' 8.8''S e 53º 42' 27.1''W e apresenta altitude média de 95m. O clima da região enquadra-se como "Cfa" (Köppen), caracterizado por ser subtropical úmido, sem estiagem, com

temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e temperatura do mês mais frio variando entre -3°C e 18°C (MORENO, 1961).

O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, de textura franco arenosa (Tabela 10), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

TABELA 10 - Composição granulométrica e densidade de partículas (Dp) do Argissolo Vermelho-Amarelo em estudo.

Camada	Areia	Silte	Argila	Dp
(m)	----------g kg^{-1}----------			g cm^{-3}
0 - 0,1	612	216	172	2,52
0,1 - 0,2	592	215	193	2,57
0,2 - 0,3	585	223	192	2,55
0,3 - 0,4	580	225	195	2,55

5.2.2 Tratamentos, delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com parcelas subdivididas, sendo três repetições para cada tratamento. Os tratamentos constaram da combinação de dois fatores: o fator A refere-se à compactação do solo, em dois níveis: (i) semeadura direta há 13 anos (SD) e (ii) semeadura direta há 13 anos com compactação adicional (CA). O fator D refere-se ao manejo do solo, sendo este também composto por dois níveis: (i) ausência de escarificação e (ii) escarificação do solo. Nas parcelas principais (6 x 8 m) foram aleatorizados os níveis do fator A, enquanto que nas subparcelas (3 x 8 m) os níveis do fator B.

Para a avaliação dos efeitos da compactação, o modelo matemático da analise e de variância do trabalho em estudo, no delineamento blocos ao acaso, é definido por:

$$Y_{jk} = m + b_k + a_j + e_{ik} \quad (1)$$

em que:

Y_{jk} = observação da variável aleatória Y, referente à unidade experimental que recebeu o nível i compactação na parcela principal, situado no k-enésimo bloco (repetição);

m = média geral do experimento;

b_k = efeito do bloco;

a_j = efeito do nível j do fator compactação na parcela principal;

e_{ik} = efeito do erro experimental;

Quando o segundo fator foi adicionado (manejo do solo), o modelo matemático do trabalho em estudo, no delineamento blocos ao acaso e parcelas subdivididas, foi definido por:

$$Y_{ijk} = m + b_k + a_i + (ba)_{ik} + d_j + (ad)_{ij} + e_{ijk} \quad (2)$$

em que:

Y_{ijk} = observação da variável aleatória Y, referente à unidade experimental (subparcela) que recebeu o nível i de compactação na parcela principal e o nível j do fator manejo do solo na subparcela, situado no k-enésimo bloco (repetição);

m = média geral do experimento;

b_k = efeito do bloco;

a_i = efeito do nível i do fator compactação na parcela principal;

$(ba)_{ik}$ = efeito da interação do bloco com o nível i do fator compactação (erro experimental referente à parcela principal);

d_j = efeito do nível j do fator manejo do solo na subparcela;

$(ad)_{ij}$ = efeito da interação do nível i do fator compactação com o nível j do fator manejo do solo;

e_{ijk} = erro experimental referente à subparcela;

O efeito dos fatores principais e a sua interação foram avaliados pela análise de variância, a 5% de probabilidade de erro. Quando o teste F foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste Diferença Mínima Significativa (DMS), a 5% de probabilidade de erro, com o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2000).

A compactação adicional foi realizada no dia 22 de junho de 2007, com uso de uma pá carregadora (Figura 14a,b), marca Case, modelo W18, com massa total de 8,531 Mg. A fim de aumentar a massa no eixo frontal, a concha da pá carregadora foi preenchida de solo, o que garantiu uma massa total de aproximadamente 10 Mg. Os pneus eram Firestone 14.00-24, os quais estavam desgastados pelo uso, o que evitou o cisalhamento superficial. A pressão de inflação dos pneus foi de 276 kPa, gerando uma pressão de contato pneu/solo de 260,7 kPa. A pressão de contato pneu/solo foi calculada pela divisão da massa total do trator por roda e a área de contato. Pelo fato da concha da pá carregadora estar repleta de solo, obteve-se uma distribuição de 50% da massa para o eixo traseiro e 50% da massa para o eixo dianteiro. A área de contato foi calculada com o auxílio do software CAD, a partir de uma imagem digital obtida da área de contato pneu/solo, a qual foi delimitada no campo com farinha.

Foram executadas duas passadas com a pá carregadora na velocidade de 1 km h^{-1}, o que resultou em uma intensidade de tráfego de 24,67 Mg km ha^{-1}. A compactação foi realizada de modo que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si, executando passadas sobrepostas às anteriores, para que toda a área fosse igualmente trafegada. No momento da compactação, a área encontrava-se coberta com azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) com massa de matéria seca de 1,43 Mg ha^{-1}. O teor de água no solo no momento da compactação, os limites de liquidez e plasticidade e o índice de plasticidade estão dispostos na Tabela 11.

A intensidade de tráfego foi calculada pela seguinte equação:

$$IT = \left(\frac{Pt * Dl}{At} \right) \quad (3)$$

em que:

IT = intensidade de tráfego (Mg km ha^{-1});

Pt = peso total de equipamento (Mg);

Dl = distância linear percorrida pelo trator (km);

At = área total trafegada (ha).

FIGURA 14 – Compactação do Argissolo Vermelho-Amarelo efetuada pelo tráfego da pá carregadora (a). Pneu deformando o solo durante o tráfego da pá carregadora (b).

TABELA 11 - Umidade gravimétrica (Ug), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) do Argissolo Vermelho-Amarelo no dia da realização da compactação.

Camada	Ug	LL	LP	IP
(m)	----------kg kg^{-1}----------			
0 - 0,1	0,14	0,20	0,17	0,03
0,1 - 0,2	0,16	0,20	0,16	0,04
0,2 - 0,3	0,15	0,20	0,16	0,04
0,3 - 0,4	0,15	0,20	0,18	0,02

6.2.3 Coleta das amostras

As amostragens foram realizadas aproximadamente um mês após a compactação. A fim de determinar o efeito da compactação, amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0 – 0,1 m, 0,1 – 0,2 m, 0,2 – 0,3 m e 0,3 – 0, 4 m. Além disso, com o objetivo de avaliar o efeito da haste escarificadora abaixo da profundidade de trabalho, foram realizadas ainda amostragens na área escarificada, nas camadas de 0,2 – 0,3 m e 0,3 – 0,4 m.

Para realizar a coleta das amostras, primeiramente, foi aberta uma trincheira (Figura 15a) de aproximadamente 0,5 m de profundidade. Após, procedeu-se a coleta das amostras em patamares, conforme ilustrado na Figura 15b, sendo a sua

altura estabelecida conforme a profundidade amostrada. As amostragens foram realizadas com auxílio de uma pá de corte, martelo, extrator, colher de construção civil e estilete. Convém ressaltar que as amostragens foram realizadas na parte central de cada camada.

FIGURA 15 – Trincheira aberta para a coleta das amostras (a). Amostragem realizada em patamares (b).

Foram amostrados dois pontos dentro de cada unidade experimental e, em cada ponto, foram realizadas duas repetições, o que totaliza uma população de 12 amostras por tratamento. Foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e preservada. As primeiras foram utilizadas para a determinação de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, o índice de plasticidade e densidade de partículas. As amostras com estrutura preservada foram coletadas com anéis de aço inoxidável de 0,06 m de diâmetro e 0,04 m de altura, a fim de determinar a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado, e com anéis de 0,061 m de diâmetro de 0,025 m de altura, para o ensaio de compressão uniaxial. Após coletadas, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos e levadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria a fim de que as determinações fossem realizadas.

6.2.4 Determinações

a) Análise granulométrica, consistência e densidade de partículas

A granulometria e a consistência foram determinadas conforme Embrapa (1997), enquanto que a densidade de partículas foi determinada pelo método do Balão Volumétrico Modificado proposto por Gubiani et al., (2006). Maiores informações das metodologias constam nas páginas 36 e 37.

b) Densidade e porosidade do solo

A densidade, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade do solo foram determinadas em uma coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006). Maiores informações da metodologia constam na página 38.

c) Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada, nas mesmas amostras usadas na determinação da densidade e porosidades, com um permeâmetro de carga constante, conforme descrito por Libardi (2005), obtida pela seguinte equação:

$$Ks = \left(\frac{q * l}{A * h * t} \right) \quad (4)$$

em que:

Ks = condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1});

q = volume de água percolado pela amostra (cm^3);

l = altura da amostra (cm);

A = área da amostra de solo (cm^2);

h = lâmina de água aplicada (cm);

t = tempo de mediação (horas).

d) Resistência mecânica do solo à penetração

Para tal determinação, realizada até a profundidade de 0,4 m, foi usado um penetrômetro digital, marca Remik CP20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com

armazenamento eletrônico dos dados, regulado para aquisição de dados a cada 0,015 m de profundidade e equipado com ponta cônica com ângulo de penetração de 30º. Além disso, foi determinada a umidade do solo na mesma profundidade avaliada pelo penetrômetro.

e) Esforços solicitados à haste escarificadora

A presença da compactação ao longo da profundidade escarificada foi verificada por meio dos dados de esforços de tração associados à haste escarificadora. Para a determinação das forças atuantes na ponteira do escarificador, foi utilizado um anel octogonal estendido simples, acoplado entre um trator MF 275 e uma estrutura tipo carrinho, o qual estava acoplado à haste escarificadora (Figura 16a,b). As especificações técnicas do anel são: material - aço 4340; tratamento térmico - têmpera e revenimento para 41,5RC; capacidade nominal: força vertical - 8kN, força horizontal (tração) - 20kN, momento - 13kN.m; resistência das pontes - 120ohm. O anel é montado rigidamente a uma haste escarificadora, de forma que a extremidade inferior da ferramenta fique a distância de 650 mm do centro do anel. Esta posição deve ser respeitada em função da calibração do anel.

Após a sua montagem mecânica, o anel foi conectado a um módulo de aquisição de dados. Depois da estabilização térmica dos circuitos, a operação passou a ser realizada através de um software de aquisição de dados, com uso de um lap top. Este anel foi desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação e Eletrônica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e pertence à EMBRAPA - Trigo. A profundidade teórica de trabalho foi de 0,2 m, tendo sido o anel configurado para uma taxa de aquisição de 20 amostras/segundo. No momento da operação, a velocidade foi de 4,3 km h^{-1} e o solo encontrava-se com teor de água de 0,155 kg kg^{-1}.

FIGURA 16 – Anel octogonal acoplado à haste escarificadora e essa ao trator (a). Anel octogonal acoplado à haste escarificadora (b).

O esforço de tração foi determinado por meio de cálculo vetorial, conforme a equação:

$$FT = \left(\frac{FH}{\cos \alpha} \right) \quad (5)$$

em que:
FT = esforço de tração;
FH = esforço horizontal;
α = ângulo de ataque.

f) Área e volume de solo mobilizado

Para a avaliação da área de solo mobilizado foi utilizado um perfilômetro. A largura do perfilômetro é de 1,35 m, com altura de 1,55 m, permitindo leituras em desníveis de até 1 m. Cada haste tem 1,20 m de comprimento e 0,01 m de diâmetro, totalizando 41 hastes, equidistantes em 0,23 m. O peso total do perfilômetro é de 10,50kg. As leituras foram realizadas com auxílio de uma máquina fotográfica digital e, para o desenho e bem como para o cálculo da área mobilizada, foi utilizado o software CAD (Computer Aided Design).

g) Ensaio de compressão uniaxial

A fim de avaliar o efeito do tráfego e da haste escarificadora no solo em estudo, foi determinada a compressibilidade, segundo a norma NBR-12007/90 (ABNT, 1990), com alteração no tempo de aplicação das cargas. Para tal, utilizou-se um consolidômetro, modelo S-450 Terraload (Durham Geo-Interprises) com indicador digital da carga aplicada e leitura analógica da deformação da amostra. Maiores informações do teste de compressão uniaxial constam nas páginas 39 e 40.

Após preparadas em laboratório, as amostras foram saturadas por capilaridade e, em seguida, equilibradas na tensão de 33 kPa em câmaras de pressão de Richards para a realização do ensaio de compressão uniaxial. Com a finalidade de eliminar o efeito da compactação do solo, as curvas de compressão foram normalizadas, ou seja, dividiu-se a densidade do solo e o índice de vazios ao final de cada carga aplicada pela densidade e índice de vazios inicial (Ds/Dsi).

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Atributos físico-hídricos

Não houve interação entre as camadas e os tratamentos estudados, tendo ocorrido apenas diferenças estatísticas entre os fatores principais na densidade e na porosidade do solo (Tabela 12). A compactação adicional (CA) elevou os valores de densidade do solo em relação ao sistema de semeadura direta (SD) (respectivamente, 1,64 e 1,52 Mg m^{-3}), mas permaneceu abaixo de 1,74 Mg m^{-3}, densidade considerada como crítica por Reichert et al. (2009a) para solos de textura franco arenosa. Da mesma forma, Secco et al. (2009) observaram aumento na densidade com aumento do nível de compactação em dois Latossolos Vermelhos de textura argilosa.

Os maiores valores de densidade do solo foram observados nas camadas 0,0 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m, as quais não apresentaram diferença estatística. Essa elevação mostra que as cargas aplicadas ao solo pelas máquinas agrícolas são acumuladas nas camadas superficiais. Similarmente, em Argissolo Vermelho de textura franco arenosa, Reinert et al. (2008) observaram incremento da densidade na camada de 0,05 a 0,30 m. Esses autores também relatam que a ausência de valores elevados

de densidade do solo na camada inicial se deve à maior densidade de raízes, ao maior teor de matéria orgânica, aos ciclos de umedecimento e secagem e ao rompimento superficial no momento da semeadura. Entretanto, essas condições não tiveram efeito no presente estudo, pelo fato da amostragem ter sido realizada um mês após o tráfego da pá carregadora e, também, devido à área ter permanecido sem cultivo nesse intervalo de tempo.

A compactação adicional (CA) reduziu a porosidade total e a macroporosidade, não tendo sido significativas as diferenças de microporosidade (Tabela 12). Os menores valores de porosidade total e macroporosidade foram observados na camada de 0,1 – 0,2 m, porém essa não diferiu estatisticamente da camada inicial para macroporosidade. Tal constatação corrobora com a presença de uma camada mais compactada, fato considerado por Reichert et al. (2007) como comum em solos sob semeadura direta. A maior microporosidade foi observada na camada de 0,0 – 0,1 m, que diferiu estatisticamente da camada de 0,3 – 0,4 m, que apresentou os menores valores, porém não diferindo das demais camadas. Esses resultados assemelham-se aos obtidos por Streck et al. (2004), que em um Argissolo Vermelho–Amarelo distrófico arênico, observaram redução da porosidade total e da macroporosidade sem aumento da microporosidade pela compactação realizada por uma máquina pesando 10 Mg.

O valor de macroporosidade considerado como crítico ao desenvolvimento de plantas é 0,1 m^3 m^{-3} (REICHERT et al., 2007; 2009a). Neste trabalho, em ambos os tratamentos, os valores estão abaixo deste limite. Esta condição pode afetar os fluxos de ar e água, o crescimento e a função das raízes e, dessa forma, prejudicar o desenvolvimento e o rendimento das culturas (REICHERT et al. 2009a).

Existe correlação positiva entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado (MESQUITA & MORAES, 2004). No entanto, mesmo a redução nos valores de macroporosidade, face à ação da compactação do solo, não foi suficiente para gerar diferenças na condutividade hidráulica deste solo ao longo do perfil (Tabela 12). Provavelmente, a grande variação observada nos valores da condutividade hidráulica, o que decorreu em um elevado coeficiente de variação (CV = 89,19%), demonstrou que essa variável teve um elevado valor de quadrado médio do erro, o que aceita a hipótese de que os tratamentos são iguais.

TABELA 12 - Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado no Argissolo Vermelho-Amarelo(1).

Camada (m)	Semeadura direta	Compactação adicional	Média
	Densidade do solo (Mg m^{-3})		
0,0 - 0,1	1,55	1,71	1,63 a
0,1 - 0,2	1,59	1,67	1,63 a
0,2 - 0,3	1,48	1,63	1,55 ab
0,3 - 0,4	1,46	1,56	1,51 b
Média	1,52 B	1,64 A	CV(%) = 3,95
	Porosidade total (m^3 m^{-3})		
0,0 - 0,1	0,380	0,354	0,367 a
0,1 - 0,2	0,339	0,341	0,340 b
0,2 - 0,3	0,382	0,347	0,364 a
0,3 - 0,4	0,383	0,369	0,376 a
Média	0,371 A	0,353 B	CV(%) = 5,09
	Microporosidade (m^3 m^{-3})		
0,0 - 0,1	0,308	0,302	0,305 a
0,1 - 0,2	0,277	0,281	0,279 ab
0,2 - 0,3	0,289	0,276	0,282 ab
0,3 - 0,4	0,277	0,276	0,276 b
Média	0,288 A	0,284 A	CV(%) = 8,00
	Macroporosidade (m^3 m^{-3})		
0,0 - 0,1	0,072	0,052	0,062 c
0,1 - 0,2	0,063	0,060	0,061 c
0,2 - 0,3	0,093	0,071	0,082 b
0,3 - 0,4	0,106	0,093	0,100 a
Média	0,083 A	0,078 B	CV(%) = 18,09
	Condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1})		
0,0 - 0,1	111,7	166,5	139,1a
0,1 - 0,2	35,5	178,4	106,9a
0,2 - 0,3	36,3	44,2	40,3a
0,3 - 0,4	134,4	79,2	106,8a
Média	79,5A	117,1A	CV(%) = 89,19

(1) Médias seguidas da mesma letra, minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste DMS a 5 % de probabilidade de erro.

Os efeitos da compactação se manifestaram na resistência mecânica do solo à penetração (Figura 17). A CA elevou os valores de resistência à penetração em relação à SD nas profundidades de 0,03 m a 0,12 m, e não houve diferenças

significativas abaixo dessa última. Em trabalhos realizados sob Latossolos de textura argilosa, Collares et al. (2008) e Secco et al. (2009) também observaram incrementos nos valores de resistência à penetração até aproximadamente 0,12m, fato atribuído ao acúmulo de tensões impostas pelo tráfego das máquinas nessa camada. O maior valor de resistência à penetração (1,5 MPa) foi observado a 0,13m de profundidade no tratamento CA. Para o tratamento SD, os valores de resistência à penetração não foram superiores a 1,4 MPa, que ocorreu a aproximadamente 0,20 m de profundidade. A maior resistência à penetração encontrada no tratamento CA se deve à maior densidade do solo em relação ao tratamento SD. Para os mesmos teores de água no solo, a resistência à penetração aumenta com a elevação do estado de compactação (GENRO JUNIOR et al., 2004).

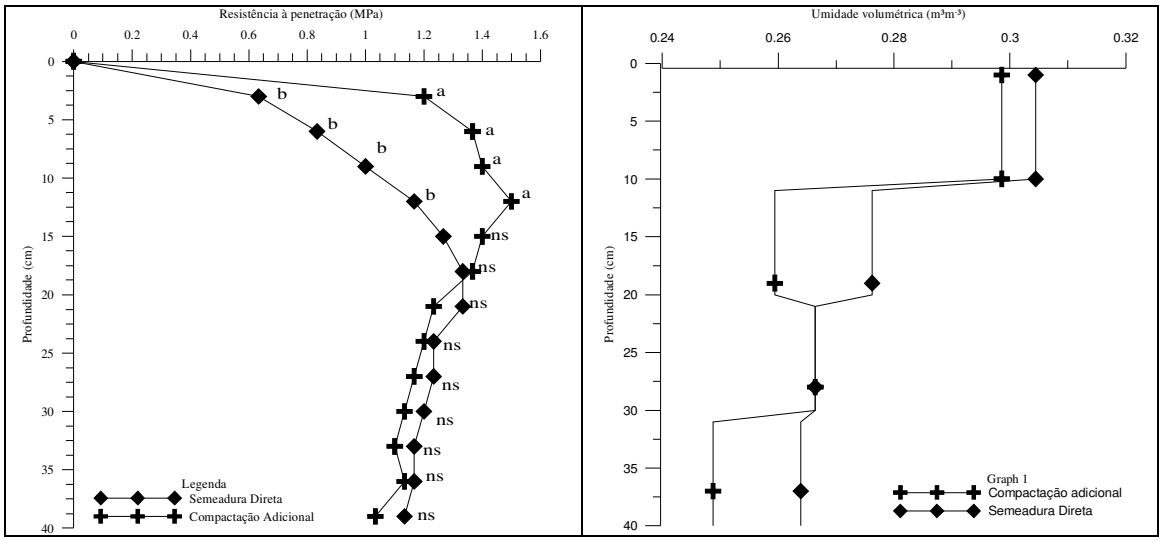

FIGURA 17 – Resistência mecânica à penetração e umidade volumétrica do solo nos diferentes tratamentos. Tratamentos com letras diferentes nas camadas, diferiram estatisticamente pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. ns. diferença não significativa.

A resistência à penetração está relacionada com diversos atributos do solo, principalmente com a densidade (RIBON & TAVARES FILHO, 2008) e o teor de água (SILVA et al., 2008). Estudando o comportamento da resistência à penetração em uma topossequência com ampla variação textural, Silva et al. (2008) observaram que a resistência variou com o teor de água. Quando seco, os valores de resistência à penetração obtidos foram elevados, ultrapassando os 2 MPa considerados como

críticos ao desenvolvimento radicular das plantas (TORMENA et al., 1998). Com o teor de água próximo à capacidade de campo, os valores permaneceram abaixo desse limite. Comportamento similar pode ter acontecido neste trabalho, pois, no momento da determinação da resistência à penetração, a umidade do solo encontrava-se elevada (em média, 0,28 kg kg^{-1} e 0,29 kg kg^{-1}, respectivamente, para os tratamentos CA e SD) (Figura 17). Em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, localizado próximo à área avaliada neste trabalho (29º 41'S, 53º 48'W) e com características semelhantes, Collares et al. (2006) observaram que a umidade na capacidade de campo, na profundidade de 0 – 0,20 m, foi de aproximadamente 0,22 kg kg^{-1}. Considerando esse valor, pode-se afirmar que a condição de umidade do solo no momento da avaliação da resistência à penetração estava acima da capacidade de campo e, por esse motivo, baixos valores de resistência foram observados. A água atua como uma espécie de lubrificante entre as partículas do solo, pois reduz a coesão e o ângulo de atrito interno, o que reduz a resistência do solo (CAMP & GILL, 1969; CUNHA et al., 2002).

6.3.2 Atributos mecânicos

Com base na curva de compressão do solo, extraem-se dois parâmetros de grande importância no estudo do processo de compactação: a pressão de preconsolidação e o índice de compressão. O primeiro indica a capacidade de suporte de pressões e o segundo a suscetibilidade do solo à compactação (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996). De maneira geral, o índice de compressão decresce (BRAIDA, 2004) e a pressão de preconsolidação aumenta com a elevação da densidade do solo (SILVA et al., 2002).

O tráfego da pá carregadora afetou a compressibilidade do solo nas camadas de 0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, pois elevou os valores de pressão de preconsolidação e reduziu o índice de compressão (Tabela 13) em ambas as camadas, quando comparado ao tratamento SD. Tal comportamento deve-se à maior densidade observada no tratamento CA, a qual, por mais que diferenças significativas não tenham sido observadas, foi maior em ambas as camadas (Tabela 12). O maior estado de compactação e a agregação mais compacta das partículas do solo tornam-no menos suscetível à compressão (SILVA & CABEDA, 2006).

Em um estudo que avaliou o efeito do tráfego na compressibilidade em um Argissolo Vermelho de textura franco arenosa, Lima et al. (2006a) observaram que o sistema que recebeu compactação adicional apresentou a menor susceptibilidade à compactação em comparação aos demais tratamentos. Por sua vez, a pressão de preconsolidação não foi influenciada pelos níveis de compactação. Em um Argissolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa, Debiasi et al. (2008) observaram que o tráfego aumentou a capacidade de suporte de carga na superfície do solo, sem alterar a sua suscetibilidade à compactação.

Os menores índices de compressão do solo sob compactação adicional indicam que este apresenta uma menor suscetibilidade a ser compactado. Porém, segundo Silva & Cabeda (2006), o fato de um solo com elevado grau de compactação apresentar maior resistência à compressão pode não ser favorável ao desenvolvimento das plantas, pois o impedimento físico em sub-superfície altera a distribuição do sistema radicular, impedindo que ultrapasse a camada compactada e se desenvolva em profundidade, além de reduzir o crescimento aéreo das plantas (SILVA et al., 2006).

TABELA 13 – Pressão de preconsolidação (σp) e índice de compressão (IC) no Argissolo Vermelho-Amarelo(1).

Tratamentos	σp (kPa)	IC
	Camada 0,0 – 0,1 m	
SD	67,76 a	0,16 a
CA	114,21 b	0,13 b
CV (%)	18,93	11,53
	Camada 0,1 – 0,2 m	
SD	79,90 a	0,16 a
CA	106,38 b	0,11 b
CV (%)	29,86	28,26

(1) Médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferiram estatisticamente pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. SD: semeadura direta, CA: compactação adicional, CV(%): coeficiente de variação.

Na Figura 18 estão ilustradas as curvas de compressão normalizadas. Na camada de 0 – 0,1 m, o tratamento SD apresentou maior redução no índice de vazios (Figura 18a) e aumento na densidade do solo (Figura 18b), sendo que as diferenças em relação ao tratamento CA foram mais evidentes quando cargas a

partir de 100 kPa foram aplicadas ao solo. Na camada de 0,10 – 0,20 m (Figura 19) comportamento semelhante foi observado, porém as diferenças na redução do índice de vazios e aumento da densidade foram observadas, respectivamente, nas cargas de 400 kPa e 200 kPa aplicadas ao solo. Quanto maior o estado de compactação, menor será a deformação do solo após a aplicação de uma pressão, pois este pode estar próximo de sua densidade máxima (BRAIDA, 2004; SUZUKI et al., 2008) e também menor será sua susceptibilidade à compactação (DEBIASI et al., 2008).

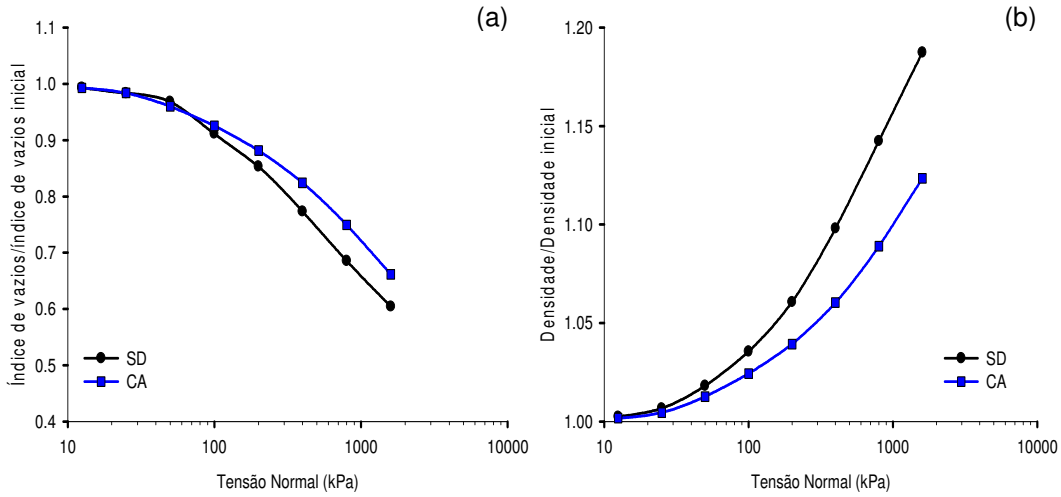

FIGURA 18 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0 – 0,10 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, CA: compactação adicional.

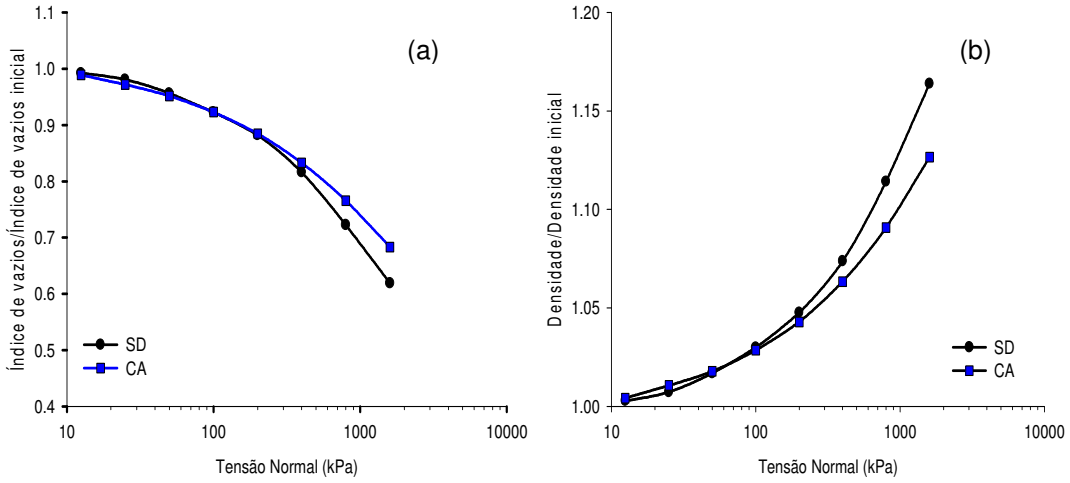

FIGURA 19 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0,10 – 0,20 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, CA: compactação adicional.

6.3.3 Esforços de tração e área mobilizada

O esforço de tração exigido pela haste escarificadora (Figura 20) sofreu influência da compactação induzida e apresentou um incremento de 21,64%, quando comparado com a demanda exigida no solo sob semeadura direta. Isso irá resultar em aumento da demanda de potência, o que pode comprometer o desempenho das máquinas agrícolas. Segundo Casão Júnior et al. (1998), é comum o trator não possuir reserva de torque suficiente para o serviço de semeadura, por exemplo. Ainda, observa-se grande variação entre os valores máximos e mínimos de esforço de tração obtidos nos tratamentos. Porém, no tratamento SD, a grande concentração dos dados ocorre em torno da média, o que mostra a maior homogeneidade desse sistema em relação à sua estrutura.

A elevação da demanda média de tração de 5,33 kN (SD) para 6,35 kN (CA) ocasionou diferença estatística significativa entre os tratamentos estudados. Da mesma forma, Rosa (2007) constatou aumento na exigência de tração de uma haste escarificadora em função do tráfego em um Argissolo Vermelho-Amarelo, na profundidade de 0,25 m e com teor de água no solo de 29,9 kg kg^{-1}. Esse autor observou que oito passadas de uma pá carregadora (10 Mg) em solo manejado pela semeadura direta há 13 anos incrementou em 15,9% a demanda de tração. No

entanto, esses valores foram bastante superiores aos observados neste trabalho (23,5 kN e 19,76 kN, respectivamente, para os tratamentos sob compactação adicional e semeadura direta), em razão da maior profundidade de trabalho do escarificador e, principalmente, do elevado estado de compactação do solo estudado por Rosa (2007), o que influencia na demanda de esforços solicitados aos mecanismos rompedores do solo (BIANCHINI et al., 1999; CONTE et al., 2007).

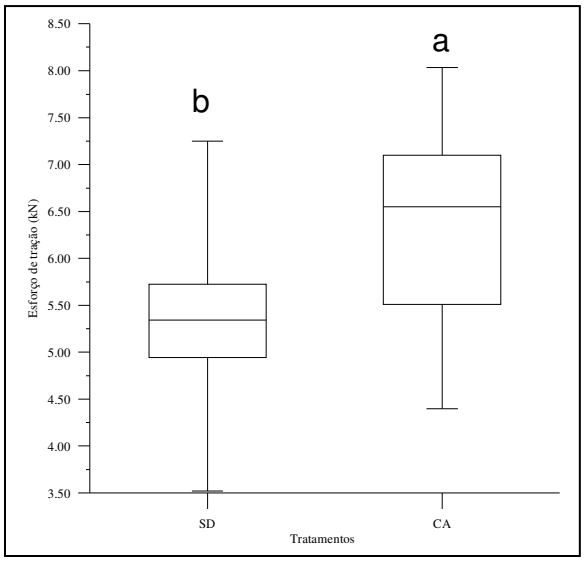

FIGURA 20 – Percentis do esforço de tração exigido pela haste escarificadora no Argissolo Vermelho-Amarelo submetido à compactação e semeadura direta. *Médias dos tratamentos com letras diferentes diferiram entre si pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. SD: semeadura direta, CA: compactação adicional.

Os valores de empolamento do solo e da área mobilizada estão dispostos na Tabela 14 e estão ilustrados na Figura 21. O efeito do tráfego, além das alterações comentadas, gerou redução de 49,9% na área mobilizada, o que repercutiu na redução de 120% no empolamento do solo, ou seja, o estado de compactação oriunda do tráfego ofereceu uma estrutura massiva altamente compacta, que proporcionou redução da eficiência da haste do implemento em romper esta camada. Resultados semelhantes foram verificados por Rosa (2007) e Rosa et al. (2008a), em solo de textura arenosa e argilosa. A verificação do presente trabalho reafirma a melhor estrutura do solo sob SD em relação ao CA.

TABELA 14 - Área mobilizada e empolamento ocasionada pela haste escarificadora nos tratamentos em estudo.

Tratamento	Área Mobilizada (cm^2)	Empolamento (cm^2)
Semeadura Direta	176,709	84,959
Compactação Adicional	117,879	38,505

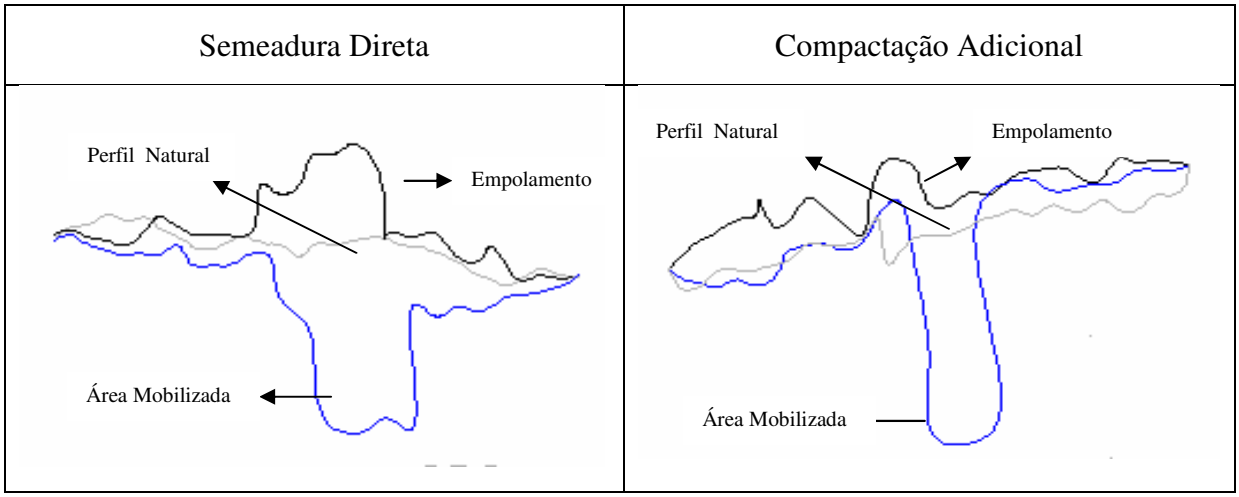

FIGURA 21 – Detalhes da Área Mobilizada, Empolamento e Perfil Natural dos tratamentos estudados.

6.3.4 Atributos físico-hídricos abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora

Os dados de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica em solo saturado nas profundidades abaixo da linha de atuação da haste escarificadora encontram-se na Tabela 15. No perfil em estudo, independentemente da ação da escarificação e da compactação, não houve interação entre os tratamentos nas propriedades físico-hídricas do solo. Entre os tratamentos, a densidade e a porosidade total do solo apresentaram diferenças, enquanto que, para a macroporosidade e microporosidade, essas diferenças não foram observadas. As maiores densidades foram encontradas nos tratamentos que sofreram ação do tráfego (CA e CAesc), e o solo sob CA diferiu do sob SD e não diferiu dos demais. Isso foi também observado nos valores médios de

porosidade total, e as parcelas que sofreram compactação adicional apresentaram os menores valores, ao contrário do solo sob semeadura direta.

O efeito da haste escarificadora no tratamento sob semeadura direta aumentou em 5,4% a densidade do solo e reduziu em 5,5% a porosidade total. Para o solo com CA, a escarificação reduziu a densidade (1,3%) e a porosidade total (2%). No entanto, em ambos os tratamentos, essas diferenças não foram significativas. Isso mostra que a haste escarificadora não gera condições nocivas à estrutura física do solo e mantém os valores de densidade e porosidade total praticamente semelhantes aos encontrados em áreas não escarificadas, e não provoca o chamado “pé-de-arado”. Esse aumento no estado de compactação em profundidade se deve, muito provavelmente, ao tráfego da pá carregadora, e mostra que as pressões transmitidas pela mesma podem chegar a maiores profundidades.

A condutividade hidráulica saturada foi maior no tratamento CAesc, que diferiu dos demais e foi observada na camada de 0,30 – 0,40 m, o que resultou possivelmente de uma fenda gerada pela ruptura do solo ocasionada pela haste. Nessa camada, também foram observados os menores valores de densidade do solo e maiores valores de porosidade total.

Observou-se incremento nos valores de condutividade hidráulica do solo saturado com a realização da escarificação. Embora a diferença não seja significativa, a escarificação elevou a condutividade hidráulica em 22,4% no solo sob semeadura direta, e 325% no solo sob CA, tornando a diferença para este último tratamento estatisticamente significativa. Essas observações demonstram que a escarificação age positivamente em solo franco arenoso, elevando a condutividade hidráulica do solo saturado também abaixo da linha de atuação da haste escarificadora.

TABELA 15 - Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado abaixo da linha de atuação da haste escarificadora no Argissolo Vermelho-Amarelo(1).

Camada (m)	Semeadura direta	Semeadura direta escarificado	Compactação adicional	Compactação adicional escarificado	Média
			Densidade do solo (Mg m^{-3})		
0,2 - 0,3	1,48	1,56	1,63	1,61	1,57 a
0,3 - 0,4	1,46	1,54	1,56	1,55	1,53 a
Média	1,47 B	1,55 AB	1,60 A	1,58 A	CV(%) = 4,84
			Porosidade total (m^3 m^{-3})		
0,2 - 0,3	0,382	0,360	0,347	0,347	0,359 a
0,3 - 0,4	0,383	0,363	0,369	0,356	0,368 a
Média	0,382 A	0,361 AB	0,358 B	0,351 B	CV(%) = 5,29
			Microporosidade (m^3 m^{-3})		
0,2 - 0,3	0,289	0,257	0,276	0,270	0,273 a
0,3 - 0,4	0,277	0,281	0,276	0,266	0,275 a
Média	0,283 A	0,269 A	0,276 A	0,268 A	CV(%) = 10,48
			Macroporosidade (m^3 m^{-3})		
0,2 - 0,3	0,093	0,103	0,071	0,076	0,086 a
0,3 - 0,4	0,106	0,082	0,093	0,089	0,093 a
Média	0,099 A	0,092 A	0,082 A	0,083 A	CV(%) = 19,61
			Condutividade hidráulica de solo saturado (mm h^{-1})		
0,2 - 0,3	36,3	20,8	44,2	190,2	72,9b
0,3 - 0,4	134,4	188,2	79,2	334,2	184,0a
Média	85,4B	104,5B	61,7B	262,2A	CV(%) = 97,29

(1) Médias seguidas da mesma letra, minúscula na vertical e maiúscula na horizontal, não diferiram estatisticamente pelo teste DMS a 5 % de probabilidade de erro.

6.3.5 Atributos mecânicos abaixo da profundidade de trabalho da haste escarificadora

Não foram observadas diferenças significativas nos valores de pressão de preconsolidação encontrados abaixo da linha de atuação da haste escarificadora (0,20 – 0,30 m) (Tabela 16), ou seja, a haste não transmitiu tensões ao solo que poderiam ter elevado seu estado de compactação. O menor e os maiores valores de índice de compressão foram encontrados, respectivamente, nos tratamentos CA e SD e SDesc, enquanto que o tratamento CAesc apresentou valores intermediários. Por sua vez, na camada de 0,30 – 0,40 m, a maior pressão de preconsolidação foi

encontrada no tratamento SD, que diferiu dos demais tratamentos. Quanto ao índice de compressão, os maiores valores foram observados nos tratamentos SD e CAesc, sendo que este último não se distinguiu estatisticamente do tratamento SDesc e este, por sua vez, não foi diferente do tratamento CA.

TABELA 16 – Pressão de preconsolidação (σp) e índice de compressão (IC) abaixo da linha de atuação da haste escarificadora no Argissolo Vermelho-Amarelo(1).

Tratamentos	σp (kPa)	IC
	Camada 0,2 – 0,3 m	
SD	118,94 a	0,21 a
SDesc	113,15 a	0,22 a
CA	105,62 a	0,13 c
CAesc	106,70 a	0,17 b
CV (%)	24,15	23,30
	Camada 0,3 – 0,4 m	
SD	104,94 a	0,24 a
SDesc	87,30 b	0,20 bc
CA	83,32 b	0,16 c
CAesc	91,49 b	0,23 ab
CV (%)	17,23	9,28

(1) Médias seguidas da mesma letra não diferiram estatisticamente pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. SD: semeadura direta, SDesc: semeadura direta escarificado, CA: compactação adicional, CAesc: compactação adicional escarificado, CV(%): coeficiente de variação.

Com base nessa constatação, observa-se que as pressões aplicadas ao solo chegaram a mais de 0,20 m de profundidade, pois os menores valores de índice de compressão foram encontrados nos tratamentos que sofreram compactação adicional. A escarificação aumentou a suscetibilidade à compactação nas parcelas com compactação adicional. Este comportamento vai de encontro ao observado na condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 15), em que a escarificação elevou em 325% os valores desta, evidenciando os efeitos positivos da ação da haste escarificadora também abaixo da sua linha de atuação. Em um Argissolo Vermelho-Amarelo, Rosa (2007) também observou efeitos positivos abaixo da camada trabalhada pela haste escarificadora, tais como a redução da resistência do solo à penetração e o maior percentual de macroporos.

Na Figura 22, estão ilustradas as curvas de compressão normalizadas da camada abaixo da linha de atuação da haste escarificadora. Observa-se que, na camada de 0,20 – 0,30 m, o índice de vazios (Figura 22a) reduziu de forma parecida para todos os tratamentos, sendo perceptível maiores diferenças a partir da aplicação de cargas de 400 kPa às amostras. A partir desse momento, a redução no índice de vazios foi maior nos tratamentos SD e SDesc. Além disso, analisando o manejo do solo, observa-se que os tratamentos que sofreram escarificação (SDesc e CAesc), apresentaram maior redução no índice de vazios do que os tratamentos não-manejados (SD e CA, respectivamente). Na camada de 0,30 – 0,40 m (Figura 23a), comportamento semelhante foi observado, porém com alterações no índice de vazios a partir de 200 kPa, indo ao encontro do observado na Tabela 16, em que menores valores de pressão de preconsolidação foram observados nessa camada.

A elevação da densidade com o aumento das cargas ao solo mostrou-se semelhante até aproximadamente 200 kPa nas camadas de 0,20 – 0,30 m (Figura 22b) e 0,30 – 0,40 m (Figura 23b). A partir dessa carga, os tratamentos SD e SDesc sofreram maiores alterações na densidade, por estarem menos densos e mais suscetíveis à compactação. Nesses parâmetros também foi possível observar os efeitos benéficos da escarificação em maiores profundidades da alcançada pela haste escarificadora, tornando-as mais suscetíveis a compactação, fato comprovado pelos maiores acréscimos nos valores de densidade normalizados.

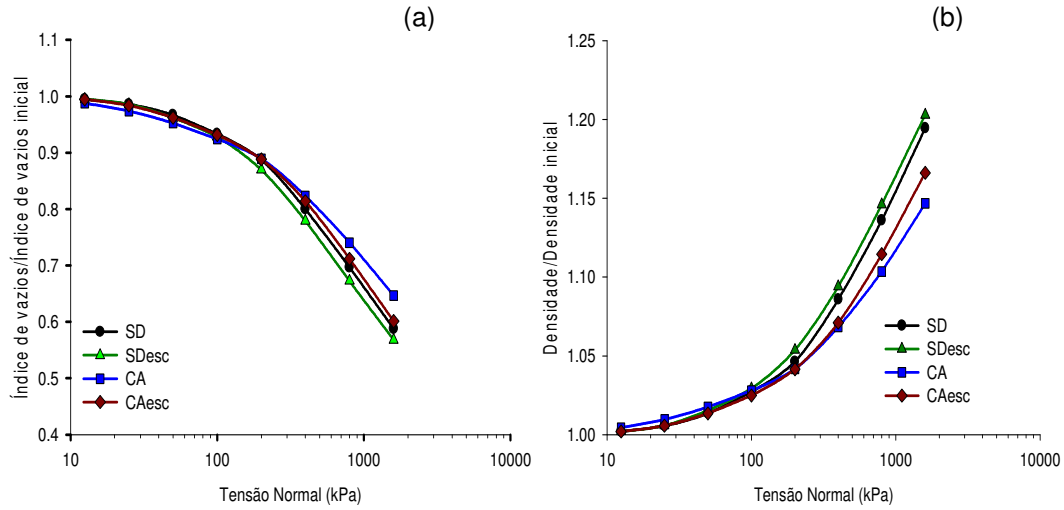

FIGURA 22 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0,20 – 0,30 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, SDesc: semeadura direta escarificado, CA: compactação adicional, CAesc: compactação adicional escarificado.

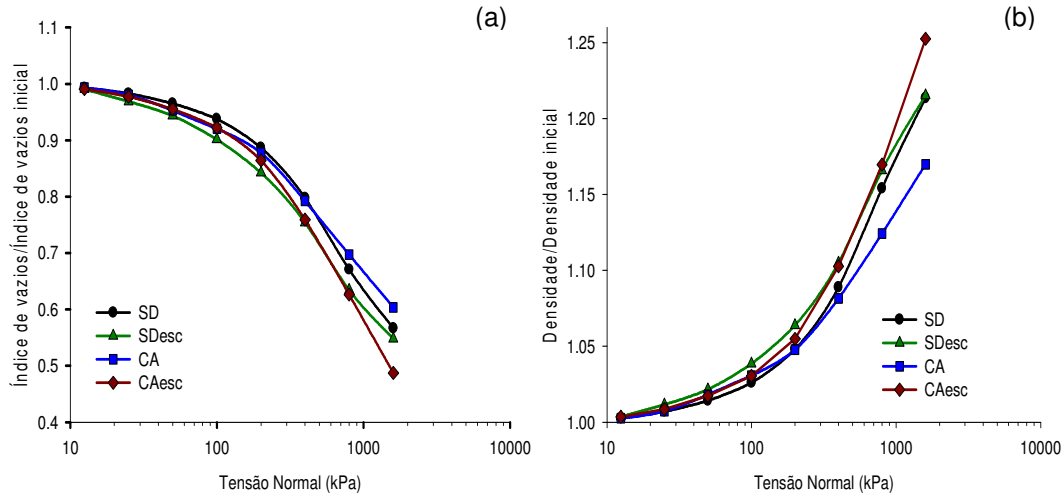

FIGURA 23 – Curva de compressão do solo normalizada na camada de 0,30 – 0,40 m de acordo com a variação do índice de vazios (a) e da densidade do solo (b). SD: semeadura direta, SDesc: semeadura direta escarificado, CA: compactação adicional, CAesc: compactação adicional escarificado.

6.4 Conclusões

A intensidade de tráfego de 24,67 Mg km^{-1} ha^{-1} eleva os valores de densidade e resistência mecânica à penetração e reduz a porosidade total e a macroporosidade, sem efeitos significativos na microporosidade.

A compactação ocasiona um incremento na demanda de tração exigida pela haste escarificadora, pois eleva os valores médios de esforço de tração e reduz a área mobilizada.

Com o tráfego da pá carregadora de 10 Mg, a suscetibilidade do solo à compactação foi reduzida e a capacidade de suporte elevada até a profundidade de 0,20 m.

A escarificação não eleva o estado de compactação do solo abaixo da linha de atuação da haste escarificadora e não é a responsável pela formação do chamado “pé-de-arado” em solo de textura franco arenosa sob semeadura direta.

A escarificação aumenta a suscetibilidade à compactação do solo abaixo da linha de atuação da haste escarificadora.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo com arroz irrigado sob o sistema convencional aliado ao intenso tráfego de máquinas reduziu a qualidade estrutural do Gleissolo Háplico quando em comparação ao solo mantido sem uso. As propriedades mecânicas não apresentaram grandes diferenças quando comparadas às condições de cultivo e ausência de uso agrícola, em função da elevada condição de umidade das amostras. Porém, esta condição é, normalmente, encontrada em solos irrigados sob o sistema de inundação, e várias práticas culturais são realizadas nesse estado, como a colheita. No entanto, a suscetibilidade à compactação foi reduzida, o que mostra que o tráfego de máquinas nessas condições dificilmente causará compactação do solo. Necessita-se de maiores estudos em solos de várzea nas condições que são realizadas as práticas de manejo, como arações e gradagens, pois estas são realizadas com o solo em menores condições de umidade.

O Gleissolo Háplico foi menos suscetível à compactação quando aumentaram o grau de saturação e a densidade do solo, enquanto que o incremento nos teores de silte, silte somado ao teor de argila e carbono orgânico do solo tornaram-no mais suscetível à compactação. A capacidade de suporte de carga não teve relação com as propriedades do solo consideradas.

O sistema de semeadura direta, quando manejado e utilizado inadequadamente, pode apresentar condições que afetam o adequado desenvolvimento das plantas. O tráfego de uma pá carregadora de 10 Mg reduziu a qualidade física do Argissolo Vermelho-Amarelo, sendo seus efeitos também sentidos na demanda energética solicitada pela haste escarificadora. A suscetibilidade do solo à compactação reduziu e a capacidade de suporte elevou.

A escarificação, prática realizada com o objetivo de aliviar os efeitos da compactação em solos cultivados sob o sistema de semeadura direta, não afeta as propriedades físicas e mecânicas abaixo da linha de atuação da haste escarificadora em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

O uso do solo, de maneira geral, altera as propriedades físicas, hídricas e mecânicas, sendo que essas alterações são dependentes das características do solo e, principalmente, quanto e em que condições o solo é utilizado e manejado.

Este trabalho faz parte de um projeto maior que procura mostrar e compreender melhor como se comportam os solos ao longo da paisagem em relação às propriedades físicas, hídricas e mecânicas. No presente estudo, procurou-se avaliar principalmente os compartimentos mais baixos da paisagem, as várzeas, locais com características marcantes, como a condição de hidromorfismo. Observou-se que esta característica afeta o comportamento do solo, principalmente em relação a suas propriedades mecânicas. Além disso, estas áreas, quando cultivadas, necessitam de grande atenção, visto a sua importante função no ecossistema, pois funcionam como uma espécie de “re-carga” do lençol freático.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 12007. **Ensaio de adensamento unidimensional.** Rio de Janeiro, 1990. 13p.

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**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun., 2004.

ALAKUKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Mechine/soil interactions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-160, oct., 2003.

ALMEIDA, C. X. et al. Funções de pedotransferência para curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2235-2243, nov./dez., 2008.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M., OLSZEVSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 857-865, jul./ago., 2000.

ARATANI, R. G. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho Acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 677-687, maio/jun., 2009.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, n. 1-2, p. 159-170, nov., 1998.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho Distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 29, n. 4, p. 507-514, jul./ago., 2005.

AZEVEDO, A. C. Funções ambientais do solo. In: AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. **Solos e Ambiente** / **I Fórum Solos e Ambiente**. Santa Maria: Pallotti, p. 7-22, 2004.

BAMBERG, A. L. et al. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1079-1086, set./out., 2009.

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 105-112, jan./fev., 1997.

BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 237-245, apr., 2006.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, jan./fev., 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. Santa Maria, **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1793-1800, nov./dez., 2004.

BIANCHINI, A. et al. Comportamento operacional de um escarificador de hastes parabólicas em solo do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.195-401, set./dez., 1999.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarficados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. 2000. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BORGES, J. R. et al. Agregação de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 9, n. 4, p. 389-395, out./dez., 2003.

BRAIDA, J. A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto.** 2004, 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 477-485, mar./abr., 2008.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 131-139, fev., 2010.

CAMARA, R. K. & KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural***,* Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813-819, jul./ago., 2005b.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.789-796, set./out., 2005a.

CAMP, C. R.; GILL, W. R. The effect of drying on soil strength parameters. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 33, n. 5, p. 461-464, sep./oct., 1969.

CASÃO JÚNIOR, R. et al. **Avaliação do desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 em plantio direto no basalto paranaense**. Londrina: IAPAR, 1998. 47 p. (Circular IAPAR, 105).

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.933-942, maio/jun., 2008.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo e produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, nov., 2006.

CONTE, O. et al. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.220-228, jan./abr., 2007.

CUNHA, J. P. A. da; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetratção sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 10, n. 1-4, p. 573-581, jan./dez., 2002.

DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. Distribuição dos solos no ambiente. In: AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. **Solos e Ambiente / I Fórum Solos e Ambiente**. Santa Maria: Pallotti, p. 23-39, 2004.

DEBIASI, H. et al. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. especial, p. 2629-2637, out./dez., 2008.

DEXTER, A. R. Soil physical quality – Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, jun., 2004.

DIAS JR., M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago., 1996.

DOURADO NETO, D. et al. Programa computacional para modelagem de curvas de retenção de água no solo (SWRC, versão 2.00**). Scientia Agricola,** vol. 57, n. 1, p. 191-192, jan./mar., 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em solos. **Manual de métodos de análise de solos.** Brasília - DF: EMBRAPA. 1997. 212p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília - DF: EMBRAPA. 2006. 412p.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: 45ª REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE

INTERNACIONAL DE BIOMETRIA. 2000, São Carlos. Anais...São Carlos: UFSCar, 2000. p.255-258.

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

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, maio/jun., 2004.

GUBIANI, P. I**. Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação.** 2008. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v 36, n. 2, p. 664-668, mar./abr., 2006.

HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter–measures.** Uppsala, Sweden, Dept. of Soil Sciences, Division of Soil Management. 2005. 153p.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V. W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v.35, n. 1-2, p. 85-97, aug., 1995.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 239-282, jun., 1988.

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

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

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

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

IMHOFF, S. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 11-18, jan./mar., 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n.1, p. 17–24, jan./feb., 2004.

IRGA. **Instituto Rio Grandense do Arroz.** Porto Alegre, RS. Capturado em 25 jun. 2010. Online. Disponível na internet http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=dados_safra_detalhes&cod_dica=224.

KAY, B. D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, v. 12, p. 1-41, 1990.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, mar./abr., 2008.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível de um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, jul./set., 2006.

KOOLEN, A. J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. (Ed) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 45-69.

LAPEN, D .R. C. et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 151-170, aug., 2004.

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

LIMA, C. L. E. et al. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactado. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1765-1772, nov./dez., 2006a.

LIMA, C. L. R. **Compressibilidade do solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada.** 2004. 70f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LIMA, C. L. R. et al. Atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1849-1855, set./out., 2008.

LIMA, C. L. R. et al. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 2, p. 179-182, abr./jun., 2006b.

LIMA, C. L. R. et al. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 199-205, jan./fev., 2003.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J. & MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 73, n. 1-2, p. 145-170, oct., 2003.

LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento de milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 175-187, jan./fev., 2005.

MACHADO, J. L. et al. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, mar./abr., 2008.

MACHADO, R. L. T. et al. Estudo de parâmetros físicos em solo de várzea, antes e após escarificação**. Revista Brasileira de Agrociência**, v. 2, n. 3, p. 175-178, set./dez., 1996.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.3, p.963-969, maio/jun., 2004.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonizações, Secção de Geografia, 1961. 46p.

MOUAZEN, A. M. et al. Two-dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content. **Soil and Tillage Research***,* Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 91-102, nov., 2003.

NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; INDA JUNIOR, A. V. Aptidão do uso dos solos e o meio ambiente. In: AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. **Solos e Ambiente** / **I Fórum Solos e Ambiente**. Santa Maria: Pallotti, p. 41-57, 2004.

OLIVEIRA, G. C. et al. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 773-781, set./out., 2003.

OLIVEIRA, M. L. de. et al. Desempenho de uma semeadora - adubadora para plantio direto, em dois solos com diferentes tipos e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1455-1463, jul., 2000.

PAULETTO, E. A. et al. Avaliação da densidade e da porosidade de um Gleissolo submetido a diferentes sistemas de cultivo e diferentes culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 2, p. 207-210, abr./jun., 2005.

PEDROTTI, A. et al. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 709-715, abr., 2001.

REICHERT, J. M. et al. Agregação de um Planossolo sistematizado há um ano e sob cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 837-844, mai./jun., 2006.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactaness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, mar., 2009a.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade de solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, jul./dez., 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 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310-319, mar., 2009b.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, set./out., 2008.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

REINERT, D. J.; ROBAINA, A. D.; 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. Viçosa. **Anais...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM, 2003.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1817 – 1825, set./out., 2008.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, V.26, n.3, p.321-344, jul./set., 2005.

ROSA, C. M. et al. Teor e qualidade de substancias húmicas de Planossolo sob diferentes sistemas de cultivo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 6, p. 1589-1595, set., 2008b.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ROSA, D. P. et al. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3; p. 395-400, mar., 2008a.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 313-319, 1995.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. et al. Effect of soil compaction and water contento n the resulting forces acting on three seed drill furrow openers. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v.81, n. 1, p. 25-37, march, 2005.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.1, p.58-64, jan./fev., 2009.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 707-804, set./out., 2004.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-930, nov./dez., 2006.

SILVA, A. P. et al. Funções de pedotransferência para curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1-10, jan./fev., 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, nov./dec., 1994.

SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 207-216, mar./abr., 2006a.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p.31-40, jan./fev., 2006.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, p. 63-90, 2006c.

SILVA, M. A. S. et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 329-337, mar./abr., 2006b.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, dez., 2000a.

SILVA, V. R. et al. 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***,* Viçosa, v. 26, n. 1, p. 1-8, jan./mar., 2002b.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** 2003. 171p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo***,* Viçosa, v. 26, n. 1, p. 9-15, jan./mar., 2002a.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.5, p.795-801, set./out., 2000b.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 239-249, abr./jun., 2000c.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. van. (ed). **Soil compaction in crop production**. Netherlands : Elsevier, p.1-21, 1994.

SOSBAI – SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil.** IV Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, XXVI Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, Santa Maria, SOSBAI, 2005.

SOUSA, R.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (reações de Redox). In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3. Ed. Porto Alegre: Evangraf, p. 185-211, 2006.

SPERA, S. T. et al. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtuvidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo***,* Viçosa, v. 28, n. 3, p. 533-542, maio/jun., 2004.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponobilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan., 1999.

STRECK, C. A. et al. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causado pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, maio/jun., 2004.

STRECK, V. D et al. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, EMATER/RS, UFRGS, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influencia nas propriedades físicas e crescimento e rendimento de culturas.** 2005. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. 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, 2004, 15. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004b. CD-ROM.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade a compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, maio/jun., 2008.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. 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, 2004, 15. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004a. CD-ROM.

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetracão e desenvolvimento do sistema radicular do milho (Zea mays) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 725–730, maio/jun., 2001

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed.** Porto Alegre: Departamento de solos – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (BOLETIM TÉCNICO, 5).

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, nov./dez., 2004.

TORMENA, C. A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 333-339, mar./abr., 1996.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, out./dez., 1998.

UHDE, L. T**. Sistema pedológico de um ambiente antropizado da Depressão Central do RS.** 2009. 226f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

VEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of na Oxisol from southern Brazil, as affected by long – term tillage systems. **Soil and Tillage Research**., Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, jan., 2007.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1271-1280, nov./dez., 2007.

WANG, D.; YATES, S. R. & ERNST, F. F. Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, time domain reflectometry, and tensiometers. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.62, n.2, p.318-325, 1998.