

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

**COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLOS E ARGISSOLO E
RELAÇÃO COM PARÂMETROS DE SOLO E DE
PLANTAS**

TESE DE DOUTORADO

Gilberto Loguercio Collares

Santa Maria, RS, Brasil

2005

COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLOS E ARGISSOLO E RELAÇÃO COM PARÂMETROS DE SOLO E DE PLANTAS

por

Gilberto Loguercio Collares

Tese apresentada ao Curso de Doutorado 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 **Doutor em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2005

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

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

**COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLOS E ARGISSOLO E RELAÇÃO
COM PARÂMETROS DE SOLO E DE PLANTAS**

elaborada por
Gilberto Loguercio Collares

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Dalvan José Reinert, PhD.
(Presidente/Orientador)

José Miguel Reichert, PhD. (UFSM)

Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC)

Afrânio Almir Righes, PhD. (UNIFRA)

Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005

Dedico este trabalho a minha família, Martha, Thaís , Kauê, e de forma muito especial a Kika que suportou a distância, enfrentou solitária a importante tarefa de ser mãe e que, com peculiar sensibilidade, continua sendo a leal companheira.

AGRADECIMENTOS

Ao Conjunto Agrotécnico Visconde da Graça da Universidade Federal de Pelotas, em especial aos colegas da área de Ciências Agrárias que possibilitaram o tempo necessário para a realização do curso que culmina com esse relato.

À Universidade Federal de Santa Maria que, através do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Solos, possibilitou a realização do curso de doutorado e a realização deste trabalho.

A CAPES, através do Programa de Incentivo a Qualificação Docente, pela concessão de bolsa de estudos, e ao CNPq e a FAPERGS que financiaram a execução do projeto de pesquisa que resultou nesse trabalho.

Ao Professor Dalvan José Reinert, que além da tarefa de orientador, foi permanentemente incentivador em todos os momentos dessa jornada, no qual reconheço amizade e leal companheirismo.

Ao Professor José Miguel Reichert a quem tive a oportunidade de conhecer e desfrutar de um fraterno convívio, ao qual expresso admiração e apreço.

De maneira muito especial, a todos aqueles que contribuíram na realização dos trabalhos de campo e de laboratório, especialmente ao amigo Flávio Fontinelli, os bolsistas de iniciação científica, Marcelo Kunz, Giovana R. Santi e, em especial ao Douglas Rodrigo Kaiser pela responsabilidade e dedicação em todas as tarefas pertinentes a esse trabalho e o reconhecimento pela sua conduta solidária com os demais desenvolvidos nesse período pelo grupo da Física de Solos.

Aos colegas de curso, Vanderlei Rodrigues da Silva, João Alfredo Braida, Silvio Aymone Genro, Deonir Secco, Jorge Luiz Mattias, Carlos Arnoldo Streck, Clóvis Orlando da Ros e Luis Eduardo Suzuki, não necessariamente nessa ordem, cujos momentos de trabalho e convívio solidário e fraterno possibilitaram que o tempo e a distância da família fossem sentidos com menor intensidade.

Aos professores e servidores técnico-administrativos do Departamento de Solos e do PPGCS, especialmente os funcionários Flávio e Tarcísio, que sempre foram muito especiais e responsáveis em suas tarefas.

A todos, próximos ou distantes que, de alguma forma contribuíram para que esses momentos fossem vividos.

Muito obrigado.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLOS E ARGISSOLO E RELAÇÃO COM PARÂMETROS DE SOLO E DE PLANTAS

AUTOR: GILBERTO LOGUERCIO COLLARES

ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2005.

A compactação dos solos está intimamente relacionada com o manejo da agricultura e da pecuária na propriedade rural. A adoção de práticas conservacionistas como o plantio direto e a integração pecuária e agricultura não tem refletido em segurança aos agricultores quanto à melhoria permanente de aspectos físicos, químicos e biológicos do solo. O desconhecimento de ideais condições de trafegabilidade e manejo dos solos, associado à umidade inadequada às práticas agrícolas, tem aumentado a compactação do solo, podendo comprometer a produtividade e o desenvolvimento de plantas exigindo a adoção de medidas extremas como a escarificação do solo para melhorar a condição presente. Foram realizados quatro experimentos a campo, onde os efeitos da compactação causada pelo tráfego de máquinas foram avaliados pelos atributos do solo e no crescimento e produtividade da cultura do feijão. Outro estudo, realizado a campo, em cinco propriedades típicas de produção leiteira do planalto riograndense, que adotavam como sistema de produção a integração lavoura e pecuária, com distintos manejos de forrageiras e tempo de permanência dos animais nas glebas, teve por objetivo estudar o impacto do pisoteio animal nos atributos físicos do solo como: densidade, porosidade e resistência do solo à penetração. No primeiro experimento foi cultivado feijão em Latossolo argiloso do Planalto Gaúcho e se estabeleceu comparação entre: a) compactação imediata aplicada por tráfego de máquina com 16,6 Mg, b) compactação residual de 6 anos de plantio direto, e c) escarificação. A compactação adicional afetou as relações massa-volume, a umidade e a resistência do solo à penetração, assim como, a produtividade e o crescimento do feijoeiro. Os outros experimentos foram desenvolvidos em Argissolo da Depressão Central do RS, com o objetivo de comparar estados de compactação imediata, compactação residual

aplicada em ano anterior e residual de compactação de 12 anos de plantio direto com a escarificação nas propriedades físicas do solo, na umidade e no crescimento e produtividade do feijoeiro. A compactação imediata foi obtida pelo tráfego de máquina com 9 Mg sobre o solo na condição presente e sobre resíduo de compactação de tráfego de 10 Mg aplicada em ano anterior. No Latossolo a densidade restritiva a produtividade do feijão e do trigo foi de 1,4 a 1,5 Mg m⁻³. Para o Argissolo, a densidade do solo restritiva a produtividade do feijoeiro foi superior a 1,7 Mg m⁻³. Os estados de compactação com densidade do solo maior que 1,8 Mg m⁻³ e macroporosidade menor que 0,1 m³ m⁻³, reduziram a altura de planta, a área foliar e a produtividade do feijoeiro em torno de 50 %. Os efeitos negativos da compactação adicional mantiveram-se após doze meses e sucessão de três cultivos (soja, aveia e feijão), reduzindo a produtividade de feijão em 61,8 %. O valor da densidade crítica baseada no intervalo hídrico ótimo (IHO) foi de 1,75 Mg m⁻³. A escarificação não representou ganho em qualidade do solo para áreas com seis anos de plantio direto em Latossolo e doze anos de plantio direto em Argissolo que implicasse em aumento de produtividade. A densidade do solo expressou o aumento da compactação do solo provocada pelo pisoteio animal, atingindo o valor de 1,77 Mg m⁻³ medida imediatamente após o pisoteio animal e mostrando-se mais significativa nas camadas superficiais do solo e, nessas, os efeitos na macroporosidade foram mais evidentes.

Palavras-chaves: compactação do solo, pisoteio animal, densidade, porosidade, IHO, umidade, feijão.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLOS E ARGISSOLO E RELAÇÃO COM PARÂMETROS DE SOLO E DE PLANTAS

AUTHOR: GILBERTO LOGUERCIO COLLARES
ADVISER: DALVAN JOSÉ REINERT
Place and Date: Santa Maria, March 01, 2005.

Soil compaction is closely related to agriculture as well as animal production management. Soil quality improvement has not been always achieved with use of soil conservation practice as no-tillage or use of animal production integrated to agriculture management. Agricultural traffic and soil management effects on soil compaction are not well known, specially associated to wet soils, and in many cases, has induced to compaction states which restrict crop growth and productivity, which in turn, has lead farmers to break the compaction using mechanical tools as plow or chisel. To better understand compaction effects and critical values of soil physical properties on black beans growth and productivity four studies were set up out in the field. Another field study were performed in five typical dairy farms in Rio Grande do Sul plateau which use systems with agriculture integrated with animal production, including forage management and time of grazing. The objective of this study was to study animal trampling effects on soil physical properties, bulk density, porosity and soil resistance. The first experiment cultivated black beans in a clayey Oxisol with the following treatments: a) immediate compaction caused by traffic of 16.6 Mg front buck loader; b) chiseling and; c) residual compaction from six years no-tillage. The additional compaction affected mass-volume relations, soil moisture and resistance, as well as black beans growth and productivity. The other three experiments were carried out in an Alfisol from central depression of Rio Grande do Sul with objectives to compare effects of immediate and residual compaction and soil chiseled on soil physical properties and black beans growth and productivity. The immediate compaction was obtained by traffic of a 9 Mg buck loader on present soil condition and on soil compacted with 10 Mg one year ago. For studied Alfisol the bulk density

which restricted crop growth and productivity had value higher than 1.7 Mg m^{-3} . The state of compaction with bulk density higher than 1.8 Mg m^{-3} and macroporosity lower than $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ reduced black beans height, leaf area index and crop productivity in about 50%. The negative effects of additional compaction were maintained after twelve months and succession of three crops (soybeans, oats and black beans), reducing the black beans productivity in 61.8 %. Breaking compaction of a Oxisol under six no-tillage or Alfisol under twelve years no-tillage by soil chiseling did not improve soil quality which induce significant black beans productivity. The bulk density expressed the increase of soil compaction caused by animal trampling, reaching values of 1.77 Mg m^{-3} , measured immediately after animal trampling and, was more significant at superficial layers where the effects on macroporosity were greater.

Key words: bulk density, porosity, compaction, soil moisture, trampling, growth and productivity , black beans

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Localização das propriedades, tempo após pastejo e manejo de plantas.....	26
TABELA 2 - Umidade gravimétrica do solo dos locais amostrados, no momento em que foi medida a resistência do solo a penetração.....	27
TABELA 3 - Caracterização granulométrica do solo das áreas, por produtor e por profundidade.....	28
TABELA 4 - Densidades e porosidades do solo de cinco propriedades da Região de Ijuí, submetido a diferentes tratamentos.....	29
TABELA 5 -. Produtividade da cultura do feijoeiro e do trigo cultivados em plantio direto com e sem compactação adicional e escarificado.....	53
TABELA 6 - Emergência das plantas do feijoeiro, nos três experimentos, a partir de 5 dias após a semeadura	70
TABELA 7 - Evolução da altura de plantas do feijoeiro nos experimentos dois e três, no intervalo de treze dias após a emergência.....	71
TABELA 8 - Área foliar das plantas de feijão dos experimentos dois e três, no intervalo de treze dias após a emergência	71
TABELA 9 -Produtividade da cultura do feijoeiro em três experimentos que diferem ao comparar tratamentos escarificado , plantio direto sobre 12 anos com o sistema com resíduo de compactação aplicada (1), compactação imediata aplicada sobre resíduo (2) e compactação imediata (3).....	72
TABELA 10 - Características granulométricas do Argissolo da área experimental. Santa Maria, RS. 2003.....	80
TABELA 11 – Densidades e porosidades do solo, no Experimento 1, submetido a diferentes manejos e níveis de tráfego e cultivado com a cultura do feijoeiro	87
TABELA 12 - Densidades, porosidades do solo, no Experimento 2, submetido a diferentes manejos níveis de tráfego e cultivado com a cultura do feijoeiro	89
TABELA 13 - Produtividade da cultura do feijoeiro em função de três estados de compactação do solo	102

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Resistência o solo à penetração nas glebas dos cinco produtores e respectivos tratamentos.As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% pelo teste DMS, e compara médias dos tratamentos em cada profundidade..... 32
- FIGURA 2 - Valores da densidade do solo e relações de porosidades na profundidade para os tratamentos PDc, com compactação adicional, Escarificado e PD, sem compactação adicional, em 13/03/2003..... 47
- FIGURA 3 - Variação da umidade volumétrica em diferentes profundidades do solo ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro. Barras verticais comparam valores de θ pelo teste DMS a 5%..... 48
- FIGURA 4 - Resistência a penetração e respectiva umidade do solo (θ), para cinco datas durante o ciclo da cultura.Barras horizontais comparam os valores de RP e θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%)..... 49
- FIGURA 5 - Distribuição radicular do feijoeiro em diferentes níveis de manejo, observada no perfil cultural (50 x 30 cm) para os distintos tratamentos, onde a dimensão da quadrícula é de 5 x 5 cm 51
- FIGURA 6 - Variação da área foliar do feijoeiro ao longo do ciclo da cultura..... 52
- FIGURA 7- Comportamento da densidade do solo e da macroporosidade em função da profundidade para os experimentos 1, 2 e 3. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade. PD – (T1) plantio direto sem compactação adicional imediata, considerando a compactação presente, ESC – (T2) plantio em área submetida a escarificação e gradagem, e PDc – (T3) plantio direto com compactação adicional imediata ou sob residual de compactação adicional no ano anterior. 66
- FIGURA 8 - Curva característica da retenção de água no solo em algumas profundidades para os experimentos 1, 2 e 3. θ é o conteúdo volumétrico de água no solo e Ψ é a tensão de água no solo. PD – (T1) plantio direto sem compactação adicional imediata, considerando a compactação presente, ESC – (T2) plantio em área submetida à escarificação e gradagem, e PDc – (T3) plantio direto com compactação adicional imediata ou sob residual de compactação adicional no ano anterior. 68

FIGURA 9 -Variação do conteúdo de água no solo com a densidade nos níveis críticos da porosidade de aeração ($\theta_{AR10\%}$), capacidade de campo (θ_{cc}), resistência do solo à penetração (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	91
FIGURA 10 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo.....	92
FIGURA 11 - Umidade volumétrica do solo ($\theta \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), limite superior e inferior do IHO para os tratamentos PD (a), Esc (b) e PDc(c), experimento 1, ao longo do ciclo do feijoeiro).....	95
FIGURA 12 - Umidade volumétrica do solo ($\theta \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), limite superior e inferior do IHO para os tratamentos PD (a), Esc (b) e PDc (c), no experimento 2, ao longo do ciclo do feijoeiro	96
FIGURA 13 - Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo (θ) em profundidade aos 5, 12, 43 e 71 DAS, para PD, Esc e PDc, no experimento 1. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam medias dos tratamentos em cada camada.....	98
FIGURA 14 - Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo (θ) em profundidade aos 5, 12, 43 e 71 DAS, para PD, Esc e PDc, no experimento 2. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam medias dos tratamentos em cada camada.....	99
FIGURA 15 - Distribuição radicular da cultura do feijoeiro no perfil (50 x 30 cm) para os tratamentos PD - Sistema de semeadura direta sem compactação adicional, Esc - Escarificado e PDc - Sistema de Plantio direto sobre área compactada por quatro passadas de máquina de 9 Mg, quatro repetições.....	101

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
θ	Umidade volumétrica do solo	$m^3 m^{-3}$
U_g	Umidade gravimétrica do solo	$kg kg^{-1}$
$\theta_{AR 10\%}$	Umidade volumétrica do solo quando a porosidade de aeração é igual a 10%	$m^3 m^{-3}$
θ_{RP}	Umidade volumétrica do solo quando a resistência mecânica do solo à penetração de raízes é igual a 2 MPa	$m^3 m^{-3}$
θ_{CC}	Umidade volumétrica do solo na capacidade de campo	$m^3 m^{-3}$
θ_{PMP}	Umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente	$m^3 m^{-3}$
CC	Capacidade de campo	$m^3 m^{-3}$
PMP	Ponto de murcha permanente	$m^3 m^{-3}$
θ_s	Umidade de saturação	$m^3 m^{-3}$
θ_r	Umidade residual, sob tensão	$m^3 m^{-3}$
ψ	Potencial matricial da água no solo	kPa
D_s	Densidade do solo	$Mg m^{-3}$
RP	Resistência do solo à penetração	MPa
IHO	Intervalo hídrico ótimo	$m^3 m^{-3}$
PD	Plantio direto	
PDc	Plantio direto com compactação adicional	
Esc	Manejo de solo escarificado	
k_a	Constante dielétrica aparente do solo	
L	Comprimento da haste metálica do sensor de TDR	cm
t	Tempo de propagação da onda eletromagnética na haste	ηs
c	Velocidade de propagação da onda na haste	$30 \times 10^9 \text{ cms}^{-1}$
DAS	Dias após a semeadura	
DAE	Dias após a emergência	
DMS	Diferença mínima significativa	

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
SUMÁRIO.....	13
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	15
2. HIPÓTESE.....	18
3. OBJETIVO GERAL.....	18
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
5. CAPÍTULO 1. COMPACTAÇÃO DO SOLO QUANDO SUBMETIDO AO PISOTEIO ANIMAL EM LATOSSOLOS DA REGIÃO DO PLANALTO GAÚCHO.....	19
5.1 Introdução.....	19
5.2 Material e Métodos.....	24
5.3 Resultados e Discussão.....	28
5.4 Conclusões.....	34
5.5 Literatura Citada.....	35
6. CAPÍTULO 2. PRODUTIVIDADE E DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO INDUZIDO PELO TRÁFEGO DE MÁQUINAS E ESCARIFICAÇÃO EM UM LATOSSOLO.....	38
6.1 Introdução.....	38
6.2 Material e Métodos.....	43
6.3 Resultados e Discussão.....	46
6.4 Conclusões.....	53
6.5 Literatura Citada.....	54
7. CAPÍTULO 3. EFEITOS DA COMPACTAÇÃO RESIDUAL E IMEDIATA NO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO EM ARGISSOLO DA DEPRESSÃO CENTRAL DO RS.....	58

3.1 Introdução.....	58
3.2 Material e Métodos.....	60
3.3 Resultados e Discussão.....	65
3.3.1 Densidades, porosidades e retenção de água.....	65
3.3.2. Parâmetros de crescimento e produtividade.....	69
3.4 Conclusões.....	73
3.5 Literatura Citada.....	74
8. CAPÍTULO 4. RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DO SOLO E A DINÂMICA DA ÁGUA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE MANEJO E ESTADOS DE COMPACTAÇÃO DE UM ARGISSOLO SOB FEIJOEIRO.....	77
8.1 Introdução.....	77
8.2 Material e Métodos.....	79
8.3 Resultados e Discussão.....	86
8.3.1. Densidade e porosidade do solo.....	86
8.3.2. Intervalo hídrico ótimo (IHO) e densidade do solo.	90
8.3.3. Umidade do solo e resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura.....	93
8.3.4. Desenvolvimento do sistema radicular e produtividade do feijoeiro.....	100
4.4 Conclusões.....	102
4.5 Literatura Citada.....	103
9. CONCLUSÕES FINAIS.....	106

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da população mundial faz com que a demanda por alimentos alcance patamares cada vez maiores e países com características e capacidade produtoras busquem a promoção de mecanismos e processos que atendam tais demandas. No Brasil, os últimos anos têm sido pautados por avanços em técnicas e procedimentos agrícolas para aumentar o rendimento e a produtividade das plantas cultivadas comercialmente e, aliado aos valores obtidos no mercado internacional principalmente pela soja, observa-se franca expansão de áreas cultivadas.

Concomitante a isso destaca-se o crescimento do plantio direto, que avança em área plantada ano a ano. Segundo dados da Federação Brasileira de Plantio Direto, estima-se que a área nacional cultivada em plantio direto, no ano agrícola 2003/2004, tenha sido em torno de 21,8 milhões de hectares. O plantio direto merece especial atenção, pois responde positivamente a muitas das preocupações vivenciadas pelo cultivo convencional, minimizando a conta dos processos erosivos causados em solos descobertos por longos períodos do ano, somado aos fatores positivos causadores do aumento do armazenamento e disponibilidade de água, com reflexos sobre a produtividade das culturas agrícolas, principalmente quando ocorrem veranicos durante seu ciclo de desenvolvimento.

No sistema plantio direto, o agricultor mobiliza minimamente o solo, mas por outro lado emprega intenso tráfego de máquinas e equipamentos, desconsiderando as condições em que o solo se encontra e os procedimentos de cultivo a que foi submetido anteriormente. Essas ações propiciam o aumento da compactação das camadas superficiais do solo, muitas vezes questionado pelos produtores como causador do decréscimo de rendimento e produtividade das culturas no decorrer dos anos.

Vários fatores integrados refletem o resultado da produção agrícola. Dentre os fatores de produção, o solo configura-se como de maior destaque e seu manejo deve ser estrategicamente planejado de forma que seus atributos sejam promotores do fluxo de ar, de água e de nutrientes às plantas. O crescimento e o desenvolvimento das plantas relaciona-se intimamente com as características e as propriedades dos solos que as suportam. A textura e a estrutura do solo atuam

indiretamente no processo, já a dinâmica do movimento de água e gases, a condição térmica e a resistência do solo à penetração de raízes têm ação direta.

O manejo do solo afeta a estrutura, alterando o arranjo de agregados e, por conseguinte, as mudanças na porosidade refletem nos fluxos de água e ar. As variações no estado de compactação do solo impõem distintas situações às plantas, pois afeta a densidade do solo, altera a porosidade e, por conseguinte, a temperatura do solo e a disponibilidade de água do solo às plantas.

Em decorrência da intensificação da agricultura, quer seja nos moldes convencionais de plantio ou com o uso do plantio direto, observam-se aumento de áreas compactadas e nessas, variações às vezes intensas ao longo do perfil do solo. No entanto, a compactação no solo, sob o ponto de vista agrônômico, somente tem significado quando interfere no processo de crescimento e desenvolvimento das plantas. As últimas safras agrícolas de verão têm sido acompanhadas de fortes estiagens que somadas aos efeitos causados pela compactação do solo, se confirmados os efeitos negativos, disponibiliza de forma deficitária a água necessária para as plantas, mesmo considerando os pressupostos básicos do sistema, os quais são promotores de melhores condições físicas ao solo.

Acompanhando este processo em que as tarefas de condução da lavoura, empregam máquinas robustas e com intenso tráfego, vários estudos têm sido realizados visando indicar os valores extremos dos atributos do solo que afetam o sistema e, ao longo do tempo, tornam-se críticos ao crescimento e desenvolvimento das plantas, de maneira intensa e causadora de prejuízos à produtividade e ao rendimento das culturas comerciais.

Pelos mesmos motivos apontados inicialmente, destaca-se no RS o aumento crescente da atividade agrícola sobre a pecuária; no entanto, a propriedade rural necessita de alternativas de uso que vislumbrem sua sustentabilidade, integrando o sistema produtivo solo, planta e animal. Uma das alternativas adotadas é a implantação de pastagens, empregada como cobertura vegetal no inverno e intercalar aos cultivos anuais de verão, promovendo a engorda de bovinos nesse período. A pecuária de leite, merecedora de destaque, interage com a produção de grãos, rotacionando áreas da propriedade com pastagens cultivadas para o pastejo animal. A alta lotação animal em áreas sob pastagem, adotadas nesses sistemas agropecuários, também é responsável por alterações na condição física dos solos

que carece de respostas ao produtor quanto aos efeitos associados ao intenso pisoteio animal.

Em quaisquer situações, diversos fatores estão envolvidos na dinâmica desses sistemas e devem ser mais bem esclarecidos. Quer seja na moderna agricultura mecanizada ou no sistema que integra a pecuária com a produção agrícola, a grande maioria dos agricultores ainda desconhece a capacidade de suporte de cargas dos solos bem como o momento ou a umidade ideal ao tráfego e/ou manejo dos solos agrícolas.

O presente estudo busca elucidar, através da análise de sistemas de produção as mudanças nos atributos físicos do solo causadas pelos procedimentos e técnicas do sistema de plantio direto e/ou por aqueles empregados na integração da lavoura com a pecuária. Especificamente, pretende avaliar as alterações das propriedades físico-hídricas dos solos quando submetidos aos efeitos de distintos estados de compactação no manejo do plantio direto e preparo sob escarificação bem como modificações provocadas nos solos quando submetido ao pisoteio animal.

Para tanto, foram realizados três experimentos em Argissolo, na Depressão Central do RS, cultivando feijão. Os arranjos experimentais compararam o manejo de solo submetido a plantio direto em área com compactação adicional imediata, compactação residual aplicada em ano anterior e histórico de pressões de 12 anos de plantio direto e o cultivo sobre área escarificada. Outro experimento foi realizado em Latossolo do Planalto Riograndense, comparando o plantio direto do feijoeiro em áreas com estado físico do solo imposto por seis anos de plantio direto, compactação adicional imediata e escarificação. Outro estudo, também em Latossolos, na região de Ijuí, RS, objetivou avaliar estados de compactação do solo, em diferentes sistemas de produção de gado de leite, onde variava o manejo de forrageiras cultivadas submetidas ao pisoteio animal imediato e residual.

Este trabalho está apresentado em capítulos que detalha os resultados obtidos nesses estudos, discutindo as diferenças para cada situação de manejo do solo com relação ao estado de compactação.

2. HIPÓTESES

Elevados estados de compactação causados por tráfego de máquinas ou pisoteio animal causam restrições ao crescimento e diminuição da produtividade de plantas.

A escarificação reduz os efeitos negativos da compactação, diminuindo a densidade e resistência do solo à penetração, melhorando o ambiente solo para o armazenamento e movimento de água, fatores que promovem maiores produtividades de plantas.

Plantas cultivadas em solos com maior estado de compactação permanecem períodos mais longos sob condições limitantes ao seu desenvolvimento.

3. OBJETIVO GERAL

Estudar relações e fenômenos associados a variações de manejo de solo em sistemas distintos de produção em que a compactação é causada pelo pisoteio animal ou tráfego de máquinas em plantio direto, estimando situações críticas ou restritivas ao crescimento e produtividade do feijoeiro.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Quantificar o impacto do manejo do solo e do estado de compactação nas propriedades físicas do solo, bem como estimar limites críticos ou restritivos ao crescimento e produtividade do feijoeiro;
- b) Relacionar a umidade do solo com o crescimento e produtividade do feijoeiro;
- c) Determinar o intervalo hídrico ótimo (índice de qualidade do solo);
- d) Relacionar a variação temporal da umidade do solo com os valores de limite superior e o limite inferior do intervalo hídrico ótimo;
- e) Analisar e verificar a quantidade de solo explorado pelo sistema radicular das plantas.
- f) Relacionar o crescimento radicular com as propriedades físicas do solo, bem como identificar quais atributos do solo exercem maiores impedimentos ao crescimento das raízes.

5. CAPÍTULO 1

COMPACTAÇÃO DO SOLO QUANDO SUBMETIDO AO PISOTEIO ANIMAL EM LATOSSOLOS DA REGIÃO DO PLANALTO GAÚCHO

5.1. Introdução

No RS, estes últimos anos têm se destacado pelo crescente aumento da atividade agrícola sobre a pecuária, no entanto, a propriedade rural necessita de alternativas de uso que vislumbrem sua sustentabilidade, integrando o sistema produtivo solo, planta e animal. Dentre muitas estratégias adotadas, a integração da agricultura com a pecuária pode ser fundamental para alcançar a sustentabilidade do sistema de produção e aumentar a rentabilidade deste agronegócio.

Os sistemas de produção de carne e leite quando são explorados de forma extensiva tradicional, não apresentam potencialmente níveis de rendimento e produtividades compatíveis com aqueles que, empregam alta tecnologia. Nesse caso, as pastagens não são consideradas como de cultivo comercial e o ambiente solo, quer seja sob o ponto de vista químico, biológico ou físico, não é manejado de forma a responder positivamente no incremento do crescimento e aumento da produtividade das culturas.

É de se esperar que, com a crescente competitividade apresentada no cenário agrícola mundial, essas atividades se tornem empresariais ou mesmo que de caráter familiar devam aportar métodos e tecnologias avançados que permitam maior oportunidade de renda e aumento da lucratividade. O emprego da integração entre a pecuária e a agricultura, de maneira organizada e com planejamento que priorize a sustentabilidade do sistema solo, água, planta e animal, remete a propriedade rural a uma situação inovadora e promissora em que o homem seja o sujeito desse processo.

Uma das alternativas é a implantação de pastagens, empregada como cobertura no inverno, intercalar aos cultivos anuais de verão, promovendo a engorda de bovinos nesse período. A pecuária de leite interage com a produção de grãos, rotacionando áreas da propriedade com pastagens cultivadas para o pastejo animal.

De uma forma mais tradicional, áreas que são cultivadas anualmente para produção de grãos interrompem a seqüência estabelecida, alternando o manejo com a implantação de pastagens perenes durante dois ou três anos empregadas para o pastoreio bovino, denominando de pousio. Em quaisquer situações, diversos fatores estão envolvidos na dinâmica desse sistema e devem ser mais bem elucidados.

Os sistemas conservacionistas de preparo do solo, incluindo as técnicas de preparo reduzido e plantio direto, formam um conjunto de atitudes e alternativas tecnológicas que obtiveram êxito com relação ao manejo dos solos agrícolas. Os princípios conservacionistas desses sistemas estão sintetizados no menor revolvimento do solo e na manutenção total ou parcial dos restos culturais na superfície, com melhoria substancial nas condições da superfície do solo e redução dos efeitos do impacto direto das gotas de chuva. Também produzem melhoria das condições físicas do solo promovendo melhoria nas condições de fluxo de ar e calor e na infiltração da água, com conseqüente redução das perdas de solo e água. Entretanto, os estudos de sistemas de cultivo e rotação de culturas manejados com a presença de animais, intercalar ou concomitante à produção de grãos ou forragens, ainda são incipientes e devem ser mais aprofundados para que se possam apresentar alternativas de uso. Assim, através do monitoramento de situações de campo, poder-se-ão obter resultados que servirão de suporte a mudanças e adoção de estratégias que mantenham o produtor na atividade, aumentando suas opções de renda.

Uma alternativa econômica importante para o desenvolvimento do setor agrícola é a utilização dessas áreas com a integração com a pecuária leiteira. A atividade leiteira requer um grande profissionalismo por parte do agricultor para obter retornos financeiros. Sistemas de criação extensiva não se aplicam à produção leiteira que exige alimentos de melhor digestibilidade e qualidade aos animais. Novamente, para a implantação de espécies vegetais de alta produção de massa verde e de proteína, o solo deverá proporcionar condições físicas e químicas favoráveis às plantas. Propriedades químicas são facilmente corrigíveis com a calagem e fertilização, enquanto que o melhoramento das propriedades físicas requer tempo e um especial conjunto de atitudes.

Na atual atividade agrícola, a busca de informações tem sido cada vez mais intensa e existe uma grande demanda por respostas quanto ao manejo de solos, à

rotação de culturas e ao fornecimento de alimentos de baixo custo para a pecuária leiteira.

No planalto riograndense, como em outras regiões do RS, a atividade de produção de leite está associada ao sistema cooperativo e integra na propriedade rural a produção de grãos e a produção de forragens, quer seja para o pastoreio direto ou para o corte. Nessa região, os proprietários adotam um sistema de produção agropecuária que emprega categorias animais de alto potencial genético, necessitando de eficiente tecnologia de produção de alimentos e elevado controle dos fatores de produção, para que esse ecossistema tenha sustentabilidade e a esperada rentabilidade seja alcançada, já que o produto final, o leite, é considerado como facilmente comercializável e de expressivo valor no mercado.

A integração lavoura-pecuária leiteira é uma excelente maneira de obter retornos econômicos com a exploração de atividades agrícolas complementares. A atividade leiteira traz um retorno mensal aos agricultores de grande relevância para o planejamento e giro de capital dentro da propriedade, não correspondida pela tradicional pecuária extensiva.

As tarefas conduzidas na agricultura alteram as relações entre os fatores físicos, químicos e biológicos do solo, buscando um estado favorável para o crescimento e desenvolvimento de plantas e produção de alimentos. Nem todas as ações promovidas pelos processos agrícolas no solo foram adequadas e aperfeiçoaram os efeitos sobre as plantas, sobre o ambiente e sobre a própria sustentabilidade econômica dos agricultores. Esse processo alterou a estrutura do solo, modificou suas relações de volume, a resistência que o solo oferece à penetração das raízes, a porosidade de aeração e a distribuição do tamanho de seus poros. Ainda mais, a infiltração, o armazenamento e a disponibilidade de água às plantas, também foram afetados, observando-se significativa redução da infiltração de água no solo, quando comparada com um solo de mata nativa. Essa diminuição da quantidade de água que infiltra no solo poderá comprometer o abastecimento de aquíferos subterrâneos.

Face aos problemas associados à compactação, como redução na infiltração de água, aumento do escoamento, redução na disponibilidade de água às plantas e, conseqüentemente, redução na produtividade dos cultivos, em várias regiões do RS os agricultores não utilizam rotações de culturas, utilizando práticas de manejo de

solos que adotam o repouso, ou mesmo, utilizando o sistema de preparo convencional do solo com maior intensidade. Portanto, há a necessidade da determinação de limites críticos da compactação e seus efeitos para tomada de decisão na adoção de um sistema de rotação com culturas de retorno econômico para o agricultor e estratégias de manejo do solo, que possam incluir espécies de cobertura com sistema radicular agressivo e/ou escarificação do solo, a fim de reduzir os efeitos negativos da compactação do solo no desenvolvimento de plantas.

Os atributos físicos dos solos manejados sob intenso pisoteio animal também alteram-se, podendo interferir no crescimento e desenvolvimento das pastagens nativas ou implantadas. Os efeitos residuais desse manejo sobre os atributos do solo permanecem encobertos pela estratégia de uso adotada pelos produtores que, em limitados espaços, utilizam crescentes lotações, ampliando a carga animal por área, desconsiderando o estado atual, quer seja quanto à umidade do solo durante o pastoreio ou mesmo com relação ao estado de compactação existente.

Algumas respostas devem ser perseguidas para balizar um adequado manejo, propiciando a implantação das culturas durante e também após a utilização da área com pecuária. Segundo Trein et al. (1991), o pisoteio bovino causa compactação do solo na camada superficial, até 7,5 cm de profundidade. A compactação exercida pelos animais pode ocorrer devido à umidade inadequada do solo durante o período de pastejo, ao sistema contínuo de pastejo e a reduzida massa de forragem nas áreas. De acordo com Cohron (1972), os bovinos exercem em média, uma pressão de 0,17 MPa por casco, podendo atingir um aprofundamento do casco no solo da ordem de 12 cm. O aumento da lotação provoca uma correspondente diminuição no rendimento das pastagens e está relacionado diretamente com o tipo de solo, com a umidade do solo durante o pastoreio, com o tipo de pastagem presente, bem como com o estado de desenvolvimento em que se encontra. Em condições inadequadas, o pisoteio animal causa a compactação do solo, a qual promove o aumento da resistência mecânica à penetração, diminuindo e até impedindo o crescimento de raízes, reduzindo o fluxo de ar e alterando os processos ou fatores que regulam a disponibilidade de água no solo e, por conseguinte, de nutrientes às plantas.

Estudos já realizados indicam que o pisoteio animal altera as propriedades físicas do solo, podendo afetar o sistema radicular e a produção das culturas (Silva

et al., 2000). No sul do Brasil, em áreas de integração lavoura-pecuária, o período destinado ao pastejo ocorre geralmente na estação de inverno-primavera que coincide com a época do ano em que o solo permanece com umidades mais elevadas, o que pode favorecer o processo de compactação (Bassani, 1996).

A compactação é comumente causada pelo tráfego de máquinas por ocasião da semeadura, tratos culturais, colheita e transporte (Hakansson et al., 1988) e pelo pisoteio de animais em áreas de pastejo (Trein et al., 1991; Soane & Ouwerkerk, 1994). Segundo Tanner & Mamaril (1959), Train et al. (1991) e Gaggero (1998), o tráfego intenso de animais, especialmente em solos argilosos úmidos, causa compactação, com redução severa da macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água.

Após pastejo intensivo, Tanner & Mamaril (1959) encontraram redução de 20% na produção de pastagens, enquanto Train et al. (1991) encontraram aumento na produtividade de milho com o uso de preparo convencional do solo após o pisoteio de animais durante o inverno, quando comparado com o plantio direto de milho. Em Podzólico Vermelho-Amarelo, Bassani (1996) não encontrou diferenças de produtividade de milho após o pastejo de inverno entre o sistema plantio direto e o preparo convencional, quando a carga animal fora ajustada ao crescimento da pastagem. Gaggero (1998) também não encontrou diferenças entre esses dois sistemas de manejo de solo, embora tenha encontrado redução de 38% na macroporosidade e aumento de 15% na densidade do solo na área pastejada pelo gado durante o inverno, em Podzólico Vermelho. Albuquerque et al. (2001) afirmam que a compactação imposta pela integração lavoura-pecuária reduziu os macroporos e, conseqüentemente, a condutividade hidráulica saturada, e aumentou a resistência à penetração.

Os efeitos negativos causados pelo pisoteio animal nos atributos físicos do solo são evidentes; no entanto, algumas atitudes com relação ao manejo do solo podem minimizar ou até impedir determinadas ações, revertendo esse processo. A aplicação de N em gramíneas forrageiras empregadas na recuperação de área minerada, quando submetida ao pastoreio, foi benéfica à maioria dos parâmetros físicos do solo, em comparação a outras formas de manejo, segundo estudos realizados por Davies & Younger (1994). Estudando alternativas de recuperação de pastagens perenes na Nova Zelândia, Harrison et al. (1994) observaram que tanto a subsolagem como a aeração mecânica do solo, feitas a 47 cm e 27 cm de

profundidade, propiciou um adequado desenvolvimento de raízes e conseqüente aumento na produção de pastagens nos períodos subseqüentes ao manejo do solo. Os autores associam o desempenho positivo da pastagem consorciada de trevo branco com azevém perene com o aumento da macroporosidade, redução da densidade do solo e aumento da condutividade hidráulica do solo.

Em virtude da grande importância que a atividade leiteira possui no estado do RS, devem-se estudar os efeitos do pisoteio nas propriedades físicas do solo, evitando que o solo se torne compactado ou degradado e seja necessário alto investimento para recuperar estas áreas degradadas.

Com base nesses fatos, associado à constante preocupação da classe produtora em relação à compactação de suas lavouras após utilização contínua com a pecuária, este estudo objetivou avaliar estados de compactação do solo, em diferentes áreas do planalto riograndense, sob diferentes manejos de forrageiras cultivadas, quando submetido ao pisoteio imediato e residual de gado leiteiro.

5.2. Material e Métodos

O estudo foi realizado em outubro e novembro de 2002, junto a produtores de leite da Cooperativa Regional Triticola Serrana Ltda., situada na região fisiográfica do Planalto Médio, nos municípios de Ijuí, Coronel Barros e Catuípe, todos com características similares aos demais da região. As avaliações foram realizadas em cinco propriedades rurais, caracterizadas por adotar sistema de produção intensiva de forragens para alimentação de gado de leite, alternando o uso da terra com a produção de grãos, tanto no inverno como no verão. As pastagens implantadas são compostas de leguminosas e gramíneas, principalmente de trevos e cornichão e a aveia, azevém e tifton. Os solos das áreas investigadas são classificados como Latossolo Vermelho, com elevado teor de argila, acima de 55 %. Os produtores adotam práticas distintas com relação ao manejo da propriedade e na maioria interage a produção de grãos com a pecuária leiteira.

O tamanho médio das propriedades não excede 50 ha, e os piquetes com pastagem cultivada, fazem parte de sistema de produção em curso na região, em que os animais são colocados em pastoreio mesmo que as condições de umidade do solo sejam desfavoráveis ao correto manejo da sua condição física. O rebanho

bovino predominante nas propriedades é da raça Holandesa e os animais adultos, em lactação, pesam, em média, 550 kg.

Em todas as glebas foi adotado o pastoreio rotativo de vacas adultas em plena lactação e, em média, o tempo de permanência dos animais na pastagem, em cada piquete, foi de três a quatro horas. As vacas retornavam diariamente até que, em média, a estatura das plantas não fosse inferior a três centímetros, ajustando a lotação animal sem causar prejuízo ao crescimento das pastagens. As pastagens são formadas por consórcio de gramíneas e leguminosas, sendo essas perenes, implantadas sob plantio direto. No caso do azevém ocorre a ressemeadura natural. O tifton foi implantado através de mudas e os procedimentos de manejo das pastagens são conduzidos de forma a controlar o pastejo para que o ciclo das culturas oportunize ressemeadura natural, fazendo com que a população de plantas atenda às demandas alimentares do rebanho na estação subsequente. A contenção dos animais nas glebas é através de cerca eletrificada.

A tabela 1 transcreve a situação das propriedades submetidas às avaliações, identificando o produtor, o município correspondente, o tipo de manejo adotado com relação às espécies forrageiras cultivadas em cada gleba, bem como o tempo transcorrido após a retirada dos animais das pastagens.

Para a determinação das relações de massa e volume, coletaram-se amostras com estrutura preservada, em cilindros metálicos de 5,36 cm de diâmetro e 3 cm de altura, em cinco camadas: 0 a 3; 5 a 8; 10 a 13; 15 a 18 e 20 a 23 cm, em três locais, aleatoriamente escolhidos, representativos do ambiente geral da gleba. A determinação da densidade seguiu a metodologia descrita em EMBRAPA (1997). As relações de porosidade foram determinadas conforme Oliveira (1968).

TABELA 1 – Localização das propriedades, tempo após pastejo e manejo de plantas.

Município	Produtor	Tratamentos		Manejo de plantas
		descrição	símbolo	
Ijuí	1-Furmann	Dois dias após pastejo	IF2	Trevo branco + cornichão
		Quatorze dias após pastejo	IF14	Trevo branco + aveia
		Vinte e oito dias após pastejo	IF28	Trevo branco + aveia/azevém
Ijuí	2- Richter	Dois dias após pastejo	IR2	Trevo branco + Tifton
		Dez dias após pastejo	IR10	Aveia + azevém
		Trinta dias após pastejo	IR30	Trevo branco + Tifton
Ijuí	3-Titzmann	Não escarificado	ITNE	Trevo branco + Tifton
		Recentemente escarificado	ITRE	Cornichão + Tifton
		Zero dia após pastejo	IT0	Cornichão + Azevém
		Dez dias após pastejo	IT10	Trevo branco + Tifton
Catuípe	4- Rusch	Um dia após pastejo	CR1	Tifton
		Vinte e oito dias após pastejo	CR28	Tifton
Coronel Barros	5- Steglich	Um dia após pastejo	CBS1	Tifton
		Dez dias após pastejo	CBS10	Trevo branco + aveia/azevém
		Trinta dias após pastejo	CBS30b	Tifton baixo
		Trinta dias após pastejo	CBS30a	Tifton alto

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada através do uso de um penetrômetro portátil, de taxa constante de penetração, com aquisição e armazenamento eletrônico dos dados, dotado de ponta metálica cônica com ângulo de penetração de 30⁰, conforme descrito por Collares et al. (2004). Essa medida foi realizada nas glebas, repetindo três vezes a penetração da haste do penetrômetro nos três locais onde foram extraídos os anéis, até a profundidade de 55 cm, sendo as leituras obtidas a cada 0,15 cm de profundidade. Foi usada a média das nove medidas para graficar a RP em relação à profundidade de penetração da haste no solo. Para obtenção da umidade, concomitante às medidas de RP, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 – 10, 10 – 20, 20 – 30, 30 – 40 e 40 – 50 cm, as quais foram colocadas em latas de alumínio com tampas lacradas com fita adesiva e acondicionadas em caixas de isopor para serem transportadas até o laboratório, local em que foram pesadas e levadas à estufa a 105 °C por 24 h e novamente pesadas. Com os dados foi obtida a umidade gravimétrica para as respectivas camadas, que está expressa na tabela 2.

TABELA 2 – Umidade gravimétrica do solo dos locais amostrados, no momento em que foi medida a resistência do solo à penetração.

Produtor	Tratamentos	Camada (cm)				
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
.....Umidade gravimétrica do solo (kg kg ⁻¹).....						
1	IF2	0,25	0,27	0,32	0,34	0,36
	IF14	0,28	0,28	0,34	0,34	0,35
	IF28	0,25	0,27	0,31	0,32	0,34
2	IR2	0,34	0,36	0,37	0,37	0,39
	IR10	0,31	0,32	0,34	0,34	0,36
	IR30	0,32	0,37	0,37	0,37	0,40
	ITNE	0,24	0,27	0,27	0,29	0,31
3	ITRE	0,25	0,30	0,30	0,32	0,32
	IT0	0,28	0,29	0,26	0,30	0,20
	IT10	0,33	0,27	0,25	0,25	0,30
4	CR1	0,28	0,32	0,34	0,35	0,35
	CR28	0,27	0,32	0,32	0,34	0,34
	CBS1	0,25	0,28	0,33	0,36	0,35
5	CBS10	0,24	0,30	0,35	0,37	0,37
	CBS30b	0,28	0,32	0,37	0,39	0,40

A caracterização granulométrica, expressa na Tabela 3, foi obtida através de amostras extraídas das quatro camadas: 0 a 10; 10 a 20; 20 a 30 e 30 a 40 cm, seguindo a metodologia descrita em EMBRAPA (1997).

TABELA 3 – Caracterização granulométrica do solo das áreas, por produtor e por camada.

Produtor	Camada (cm)							
	0 -10	10 -20	20 - 30	30 - 40	0 -10	10 - 20	20 - 30	30 - 40
 Argila, g kg ⁻¹ Areia, g kg ⁻¹			
1	458	601	655	711	184	152	134	93
2	525	670	679	710	109	94	68	71
3	411	437	506	553	248	224	200	188
4	535	607	669	581	139	101	81	136
5	558	577	702	714	111	136	71	61

5.3. Resultados e Discussão

A densidade do solo refletiu o efeito do pisoteio animal nas áreas em estudo, onde na maioria das glebas e tratamentos, nas camadas superficiais, foi superior àquela sugerida por Reinert et al. (2001), que estabelece valor restritivo de densidade do solo de 1,45 Mg m⁻³ para solos com teores de argila acima de 55 %, considerando a produtividade das culturas como referência. Reichert et al. (2003), para Latossolos com teores de argila maiores que 70%, apontam uma densidade crítica no entorno de 1,40 Mg m⁻³, estabelecido a partir do indicador de qualidade estrutural do solo IHO.

Na propriedade do produtor 1, mesmo as diferenças em relação ao tempo após pastejo ou o manejo de culturas na gleba, não foram capazes de interferir no decréscimo da densidade do solo, que se manteve superior a 1,45 Mg m⁻³ até a profundidade de 23 cm. Tal situação contrasta com os dados do produtor 2, em que os tratamentos são similares e os valores absolutos de densidade do solo são menores à medida que aumenta o intervalo de tempo após pastejo. O pisoteio animal realizado sob condições de umidade elevada aumenta a degradação física do solo prejudicando o crescimento de plantas (Betteridge et al., 1999).

TABELA 4 - Densidades e porosidades do solo de cinco propriedades da região de Ijuí, submetido a diferentes tratamentos.

Produtor	Tratamentos	Camada (cm)					
		0 - 3	5 - 8	10 - 13	15 - 18	20 - 23	
1	IF2 IF14 IF28	Densidade (Mg m ⁻³)					
		1,55 a	1,52 a	1,49 a	1,52 a	1,47 a	
		1,45 b	1,54 a	1,46 a	1,42 a	1,47 a	
			Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
			1,50 ab	1,55 a	1,47 a	1,49 a	1,44 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,07 a	0,06 a	0,08 a	0,08 a	0,07 a
			0,10 a	0,07 a	0,10 a	0,11 a	0,06 a
			0,06 a	0,05 a	0,09 a	0,07 a	0,06 a
1	IF2 IF14 IF28	Densidade (Mg m ⁻³)					
		0,45 a	0,43 a	0,44 a	0,41 a	0,45 a	
		0,44 a	0,43 a	0,41 b	0,43 a	0,45 a	
			Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,44 a	0,42 a	0,43 ab	0,44 a	0,46 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			1,45 a	1,43 a	1,39 a	1,35 a	1,33 a
			1,38 a	1,44 a	1,32 a	1,28 a	1,22 a
			1,39 a	1,46 a	1,42 a	1,38 a	1,28 a
2	IR2 IR10 IR30	Densidade (Mg m ⁻³)					
		0,05 a	0,05 a	0,05 a	0,11 a	0,07 a	
		0,10 a	0,06 a	0,07 a	0,09 a	0,10 a	
			Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,08 a	0,05 a	0,05 a	0,05 a	0,09 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,51 a	0,51 a	0,50 a	0,48 a	0,55 a
			0,47 b	0,48 b	0,49 a	0,48 a	0,46 b
			0,50 a	0,51 a	0,50 a	0,52 a	0,50 b
3	ITNE ITRE IT0 IT10	Densidade (Mg m ⁻³)					
		1,46 bc	1,53 a	1,48 b	1,52 a	1,50 a	
		1,42 c	1,44 b	1,44 b	1,55 a	1,51 a	
		1,77 a	1,57 a	1,52 ab	1,56 a	1,54 a	
			Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
			1,56 b	1,56 a	1,65 a	1,66 a	1,51 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,08 a	0,07 a	0,07 a	0,04 b	0,07 a
			0,09 a	0,08 a	0,07 a	0,06 a	0,05 b
			0,07 a	0,06 a	0,07 a	0,06 a	0,06 ab
			0,06 a	0,07 a	0,06 a	0,06 a	0,05 ab
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
		0,46 a	0,45 a	0,45 ab	0,47 a	0,45 a	
		0,46 a	0,46 a	0,48 a	0,49 a	0,47 a	
		0,45 a	0,44 a	0,45 ab	0,44 ab	0,45 a	
		0,46 a	0,41 a	0,38 b	0,39 b	0,48 a	
4	CR1 CR28	Densidade (Mg m ⁻³)					
		*	1,44 a	1,36 a	1,28 a	1,29 a	
		*	1,46 a	1,38 a	1,33 a	1,35 a	
			Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
			*	0,08 a	0,05 a	0,10 a	0,09 a
			*	0,07 a	0,06 a	0,09 a	0,07 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			*	0,46 a	0,48 a	0,48 a	0,48 a
			*	0,49 a	0,49 a	0,49 a	0,49 a
5	CBS1 CBS10 CBS30b	Densidade (Mg m ⁻³)					
		1,48 a	1,50 a	1,44 a	1,40 a	1,40 a	
		1,33 b	1,41 b	1,47 a	1,39 a	1,39 a	
			Macroporosidade (m ³ m ⁻³)				
			1,42 ab	1,48 a	1,41 a	1,39 a	1,33 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,06 b	0,06 a	0,06 a	0,07 a	0,08 a
			0,09 a	0,06 a	0,06 a	0,10 a	0,12 a
			0,05 b	0,06 a	0,07 a	0,05 a	0,06 a
			Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
			0,48 b	0,46 a	0,48 a	0,49 a	0,47 a
			0,46 b	0,46 a	0,45 a	0,48 a	0,49 a
		0,56 a	0,47 a	0,49 a	0,49 a	0,51 a	

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

* amostras perdidas.

Para o produtor 3, a densidade do solo se reduziu e diferencia-se pelo efeito da escarificação recente, (ITRE) quando comparada aos tratamentos que estão sob pisoteio animal, não diferindo significativamente do piquete que não foi escarificado (ITNE) e não está sob influência do pisoteio. O IT0 reflete a compactação imediata causada pelo pisoteio animal e o intervalo de tempo após o pastejo pode ter sido responsável pelo valor de densidade do solo de $1,77 \text{ Mg m}^{-3}$, na camada superficial, bastante superior aos demais. A densidade do solo para esta área é elevada. Essa situação não se reproduz com a mesma intensidade com a profundidade, pois nesse tratamento, assim como os demais dessa área, a densidade do solo é evidentemente elevada em todas as camadas, não sendo explicado somente pelo intervalo de tempo após o pastejo.

Os dados de densidade do solo, excetuando o solo nas propriedades dos produtores 1 e 3, com densidade acima de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ até os 23 cm, de maneira geral, expressam a compactação do solo ocasionada pelo pisoteio animal que atinge valores superiores àqueles preconizados pela pesquisa, principalmente na camada até 10 cm. Isso evidencia que o casco animal não provoca impacto na compactação à medida que se aprofunda no perfil do solo, concordando com as afirmações de Trein et al. (1991). Como no sistema de produção a pecuária leiteira interage com a produção de grãos, os valores encontrados para a densidade do solo dos produtores 1 e 3 podem ser devido ao resíduo de compactação provocada pelo tráfego de máquinas agrícolas utilizadas no manejo do plantio direto amplamente adotado.

Quanto à porosidade, não houve muitas diferenças estatisticamente comprovadas, embora se evidencie aumento do volume de microporos e redução dos macroporos (Tabela 4), podendo se inferir associação com o estado de compactação. Na média, os valores de microporosidade são maiores que o normalmente encontrado em áreas naturais e os valores de macroporosidade inferiores aquele considerado crítico para o pleno desenvolvimento das plantas que é de 10 a 15 % (Vomocil & Flocker, 1966). Uhde et al. (1996) não encontraram diferenças significativas na densidade do solo, na macroporosidade e na microporosidade em áreas com e sem pastejo intensivo, numa sucessão de culturas de trevo subterrâneo e milho, embora tenham verificado a diminuição na capacidade de infiltração da água no solo.

A compactação causada pelo pisoteio animal reduziu a macroporosidade do solo podendo comprometer o processo de infiltração da água no solo e diminuir sua

capacidade de aeração. Pelo estado de compactação nas glebas, mesmo que os valores observados sejam críticos ao desenvolvimento e crescimento de plantas, os sistemas de produção agrícolas implantados nas propriedades não demonstram, pelas manifestações dos produtores, afunilamentos imediatos com relação à produção de pastagem e leite, atingindo patamares considerados razoáveis à média de produtividade regional. Essas evidências podem ser explicadas pela atitude dos produtores que diversificam o manejo da propriedade, quer seja pela integração da lavoura com a pecuária ou ainda com a variação do uso de espécies vegetais dotadas de diferentes hábitos de crescimento capazes de promover um adequado ambiente de recuperação das propriedades do solo ao longo do tempo e podem estar influenciando os resultados obtidos pelo sistema.

No entanto, a modificação na estrutura do solo, provocada pelo intenso pisoteio, provoca alterações na densidade do solo e se reflete na resistência à penetração, concordando com as afirmações de Albuquerque et al. (2001). As observações apontam para uma maior RP nas camadas entre 0 a 20 cm em quase todas as glebas e nessas, em todos os tratamentos, coincidindo com as altas densidades encontradas nessas camadas.

De acordo com as variações da RP (Figura 1), no solo do produtor 1, observa-se que os tratamentos com tempo de 2 e 14 dias após o pastejo, estão praticamente dentro dos limites não restritivos de resistência à penetração, para a umidade do solo no dia das determinações. Provavelmente isso ocorre pelo uso de espécies vegetais, na qual se destaca o trevo branco que por características do sistema radicular e a conformação da estrutura aérea não ereta podem contribuir no amortecimento do impacto da pata animal e diminuição da compactação.

No tratamento com tempo de 28 dias após pastejo (IF28), que o produtor promove o manejo da área rotacionando com o cultivo da soja em semeadura direta, observa-se um maior valor de RP, provavelmente ocasionado pela intensidade de uso de máquinas, principais causadoras da compactação de solos agrícolas, além do efeito residual do pisoteio animal.

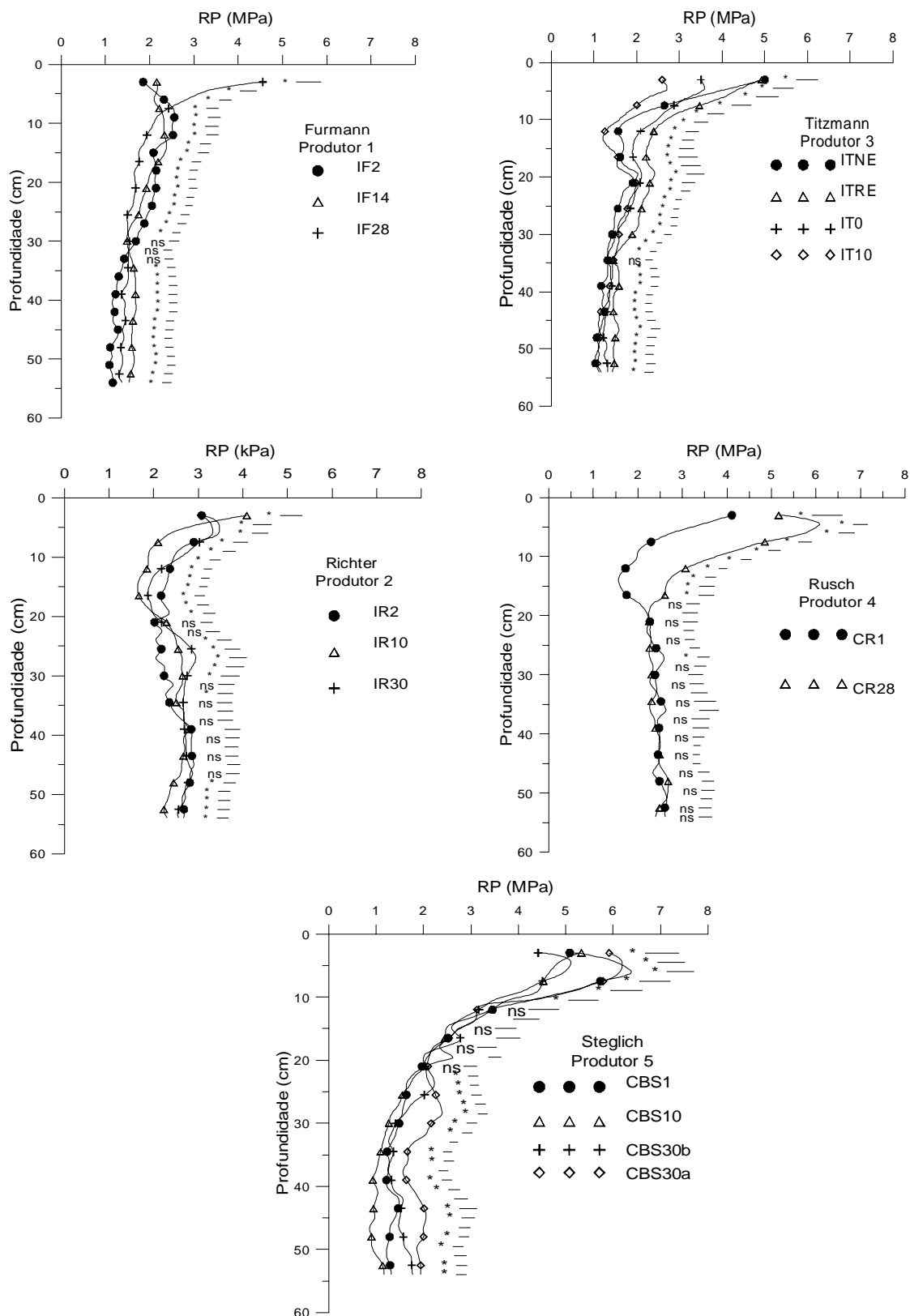


FIGURA 1 - Resistência do solo à penetração nas glebas dos cinco produtores e respectivos tratamentos. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% pelo teste DMS, e compara médias dos tratamentos em cada profundidade.

Podemos observar ainda que, nas áreas dos produtores 1, 3 e 5, houve diminuição significativa na RP ao longo do perfil do solo, sendo que, nas camadas abaixo de 20 cm, os valores de alguns tratamentos estão no entorno de 2 MPa ou abaixo desse. Rúbio & Lavado (1990), estudando a ação do pisoteio sobre a compactação do solo e sua posterior regeneração, em áreas pastejadas continuamente, sob pastoreio rotativo e não pastejadas evidenciam que a resistência à penetração superficial não diferenciou as distintas formas de pastoreio e a porosidade total do solo foi reduzida nos primeiros quatro centímetros somente quando o pastoreio foi contínuo.

Com relação ao produtor 3, as glebas que compõem os tratamentos ITNE e ITRE, localizada uma ao lado da outra, diferiam com relação ao manejo, visto que ITRE havia sido escarificado recentemente e ITNE não escarificado. Nesse caso a escarificação não foi eficaz na diminuição da RP, pois os valores de RP para ITRE não foram inferiores a 2,5 MPa, próximos aos valores de ITNE, o qual não foi submetido à escarificação.

As avaliações nas glebas do produtor 3, que diferiam somente pelo tempo após pastejo, mostram que a RP foi significativamente menor, podendo indicar que o repouso preconizado pelo pastoreio rotativo tenha beneficiado as condições físicas do solo, quando avaliada pela resistência à penetração.

A resistência à penetração dos locais referentes aos produtores 2 e 4 (Figura 1), nas camadas inferiores aos 20 cm, foi próxima de 2,5 MPa, acima do qual ocorrem limitações ao crescimento e desenvolvimento das raízes. Exceto nas áreas do produtor 1, em todos os demais produtores, na camada até os 10 cm, a resistência à penetração foi superior a 2,5 MPa. Os dados evidenciam que nas áreas do produtor 5, até os 12 cm, a RP foi superior a 3 MPa. Os gráficos de RP, apresentados nas figuras, expressam, de maneira geral, elevados valores nas camadas superficiais, causados pelo intenso pisoteio animal, confirmando as observações de Trein (1991), mas decrescendo significativamente com a profundidade. Observações realizadas em áreas cultivadas intensamente sob plantio direto apresentam geralmente valores menores na camada superficial e crescentes com a profundidade até um máximo, ocasionado pelo intenso tráfego de máquinas agrícolas. Como em todas as áreas estudadas o manejo de acesso dos animais às pastagens é rotativo (pastejo em algumas horas do dia), o crescimento do sistema radicular não foi tão fortemente impedido, quando motivado pela diminuição severa

da parte aérea das plantas que utilizaria as reservas do sistema radicular na sua manutenção. Com isso, uma razoável fitomassa aérea faz com que as raízes, ainda que as condições físicas externas sejam desfavoráveis ao crescimento, persistam e explorem maiores volumes de, solo auxiliando no processo de descompactação.

5.4. Conclusões

A densidade do solo expressa o aumento da compactação do solo provocada pelo pisoteio animal, atingindo o valor de $1,77 \text{ Mg m}^{-3}$ medida imediatamente após o pisoteio e mostra-se mais significativa nas camadas superficiais do solo e, nessas, os efeitos na redução da macroporosidade são mais evidentes.

A resistência à penetração sinaliza o mesmo que a densidade do solo, e elevados valores alcançados são causados pelo pisoteio animal em condição de umidade do solo inadequada.

As propriedades do solo avaliadas revelam o estado de compactação provocado pelo pisoteio. Mesmo assumindo valores bastante restritivos, não podem ser definidores da alteração no sistema de produção, mas sim indicadores primários da qualidade do solo.

5.5. Literatura Citada

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

BASSANI, H. J. **Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não pastejada**. 1996. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Biodinâmica de Solos), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1996.

BETTERIDGE, K., MACKAY, A.D., SHEPHERD, T.G., BARKER, D.J., BUDDING, P.J., DEVANTIER, B.P.; COSTALL, D.A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Journal of Soil Research**, v.37, p.743-760, 1999.

COHRON, G. T. Forces causing soil compaction. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDER BERG, G.E. **Compaction of agricultural soils**. Beltsville: ASAE, 1972. p.106-122.

COLLARES, G.L., REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Desenvolvimento e funcionalidade de um penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo. In : REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004. (CD-ROM)

DAVIES, R., YOUNGER, A. The effect of different post-restoration cropping regimes on some physical properties of a restored soil. **Soil Use and Management**, v.10, p.55-60, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

GAGGERO, M.R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 125f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

HAKANSSON, I, VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, v.11, p.239-282, 1988.

HARRISON, D.F., CAMERON, K.C., McLAREN, R.C. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. **New Zealand Journal of Agricultural Research**. v.37, p.599-567, 1994.

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.197-200, 1968.

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

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R; PETRY, M.T.; ROSA, G.M., CERETTA, C.A. ed. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, p.114-133, 2001.

RUBIO, G.; LAVADO, R. Efectos de alternativas de manejo pasturil sobre la densidad aparente de un Natracualf. **Ciencia del Suelo**, v 8, p.79-82, 1990.

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

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, 1994. p.01-21.

TANNER, C.B.; MAMARIL, C.P. Pasture soil compaction by animal traffic. **Agronomy Journal**, v.51, p.329-331, 1959.

TREIN, C.R., COGO, N.P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia+trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.105-111, 1991.

UHDE, L.T., COGO, N.P., TREIN, C.R.; LEVIEN, R. Comportamento da sucessão trevo/milho, em área com e sem pastejo intensivo, sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.493-501, 1996.

VOMOCIL, J.A; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.4, p.242-246, 1966.

6. CAPÍTULO 2

PRODUTIVIDADE E DESENVOLVIMENTO DO FEIJOEIRO EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO INDUZIDO PELO TRÁFEGO DE MÁQUINAS E ESCARIFICAÇÃO EM UM LATOSSOLO

6.1. Introdução

O planalto riograndense, especialmente aquelas regiões que compõem os Latossolos gaúchos, são responsáveis por significativas parcelas da produção de grãos. Essa condição faz com que especiais atitudes sejam tomadas pela pesquisa, no sentido de minorar os efeitos causados pelo intenso uso das terras devido à alta suscetibilidade à degradação dos solos, principalmente a erosão, causando históricas perdas de solos que motivaram inúmeros programas governamentais de combate aos efeitos negativos provocados por precipitações intensas em solos com cobertura vegetal inexistente ou reduzida.

O sistema de plantio direto, amplamente empregado nas lavouras dessas regiões, contribuiu para minimizar em muito esses efeitos, particularmente pela continuada deposição de palhada, mantendo o solo coberto durante todo o ano, alicerçado ao mínimo revolvimento. No entanto, esse sistema induz a adoção de uma mecanização intensa com maquinaria cada vez mais robusta, promovendo efeitos negativos na estrutura desses solos, em especial o aumento da compactação, pois o tráfego de máquinas ocorre em condições inadequadas de umidade além transgredir a capacidade de suporte desses solos.

Essas ações têm suscitado inúmeras investigações no intuito de responder as demandas dos produtores de grãos e pastagens que observam gradativo aumento da compactação dos solos, principalmente das camadas superficiais. Na adoção desse sistema, alguns relatos pontuais apontam o aumento da umidade do solo embora poucos estudos evidenciam essa informação, apenas em específicos

momentos do ciclo da cultura. Outra condição presente nesses agrossistemas refere-se aos efeitos climáticos negativos impostos pelo desequilíbrio na distribuição de chuvas nos períodos de implantação e condução das lavouras comerciais, ocorrendo freqüentes estiagens nos mais variados estágios vegetativos das plantas, associado aos aspectos intrínsecos do solo que impõem variação na capacidade de armazenamento e disponibilidade de água quando submetidos ao intenso tráfego de máquinas. A disponibilidade de água às culturas é variável de acordo com a espécie vegetal e o tipo de solo. Além disso, o manejo dado ao solo é muito importante no aumento ou redução da disponibilidade hídrica dos solos.

A compactação condiciona atributos do solo, os quais interferem direta ou indiretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo esses intimamente dependentes da umidade do solo. Portanto, o estado de compactação, fruto de distintas estratégias de manejo dos solos, pode alterar os fatores físicos que promovem condições ideais ou limitantes ao crescimento vegetal. A compactação dos solos agrícolas tem aumentado nos últimos anos e vem se tornando um fator limitante ao aumento da produtividade e a sustentabilidade do sistema plantio direto (Silva, 2003), especialmente em solos argilosos.

O sistema plantio direto está amplamente difundido na região sul do Brasil e avança rapidamente para as regiões do cerrado brasileiro (Hernani & Salton, 1998). Esse sistema de manejo do solo adaptou-se bem às condições de solo e clima brasileiro, com importantes aumentos de produtividade de culturas como soja, milho, trigo, cevada e outras. O aumento de produtividade que se conseguiu com o sistema plantio direto foi uma integração de diversos fatores, tais como a manutenção e, algumas vezes, um pequeno aumento da matéria orgânica do solo, melhoria das características físicas e, especialmente, diminuição da erosão do solo. O sistema convencional de preparo do solo, com revolvimento intensivo do solo, causou degradação da estruturação, com conseqüências na diminuição da infiltração de água no solo, ocasionando graves problemas de erosão do solo, especialmente nos estados do Sul do Brasil, onde o período de preparo do solo para a maioria das culturas anuais de verão coincide com a ocorrência de chuvas de alto poder erosivo (Cogo et al., 1978).

A taxa de infiltração é fortemente afetada pelas características da camada superficial do solo, tais como restos culturais na superfície ou parcialmente incorporados, cultura implantada, rugosidade superficial, porosidade e umidade

inicial. No sistema plantio direto, além de existir palha na superfície, existe também palha parcialmente decomposta, que interage com a superfície do solo. A combinação do efeito dessa palhada na superfície do solo com uma rede de macroporos contínuos em profundidade proporcionam um aumento da infiltração de água, quando comparamos o sistema plantio direto e o sistema convencional de preparo do solo. Mas quando comparamos o sistema plantio direto com a condição natural, verificamos que ainda há um decréscimo na quantidade de água infiltrada no solo (Kertsmann, 1996; Klein, 1998).

Apesar dos benefícios oriundos do sistema plantio direto, há trabalhos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetidos a esse sistema (Hakansson et al., 1988; Reinert, 1990). Esse estado diferenciado de compactação era de se esperar, pois, como não há o revolvimento do solo, as pressões causadas pelo tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas (Carvalho Jr., 1998) elevam o estado de compactação do solo. Apesar do aumento do estado de compactação, pouco se sabe sobre a influência do aumento da compactação na relação com os atributos físicos e hídricos do solo e na relação com o desenvolvimento das plantas. Kertsmann (1996) utilizando cilindros duplos concêntricos, em Latossolo roxo, encontrou que a taxa constante de infiltração em mata nativa foi de 1.396 mm h^{-1} e na área com sistema plantio direto por 15 anos e cultivo intensivo com pouca cobertura morta foi de apenas 63 mm h^{-1} , demonstrando que, apesar de se utilizar o sistema plantio direto, houve uma drástica redução da infiltração, mais de 20 vezes, em função do manejo do sistema plantio direto.

A compactação do solo provoca redução de produtividade e, principalmente, redução do crescimento das raízes das plantas. Estudos em vasos demonstraram que para um solo franco-argiloso, mantido com umidade próxima à capacidade de campo e aeração acima de 10 %, a densidade do solo de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ proporcionou uma resistência do solo de 3,5 MPa e foi limitante ao crescimento de raízes de trigo (Merotto & Mundstock, 1999).

Estudos sobre os efeitos da compactação em camadas de solo compactadas artificialmente nem sempre imitam o que as plantas percebem no campo, pois existem no solo regiões de menor resistência por onde as raízes das plantas podem se desenvolver e, durante o ciclo da cultura, as mesmas podem experimentar períodos de menor resistência do solo devido às flutuações de umidade do solo (Taylor & Brar, 1991). Em condições de campo, o milho cultivado em sistema plantio

direto apresentou, na profundidade de 0 a 40 cm, menor densidade de raízes (cm de raiz por cm³ de solo) do que no sistema de preparo convencional de solo, enquanto que, na camada até 10 cm, o sistema plantio direto apresentou maior densidade de raízes (Silva et al., 2000). Estudos sobre os efeitos da compactação medidos diretamente no campo, portanto, são necessários e demandam várias determinações durante o ciclo da cultura.

Um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho dos poros, haja vista que a macroporosidade se forma pela união de agregados grandes por forças eletrostáticas, pela atividade microbiana e crescimento de raízes. A estrutura do solo é modificada em função da compactação, sendo que os macro agregados são destruídos e o solo apresenta uma estrutura maciça (Tavares Filho et al., 1999). Essa estrutura maciça pode impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

A compactação dos solos agrícolas tem aumentado nos últimos anos e vem se tornando um fator limitante ao aumento da produtividade e a sustentabilidade do sistema plantio direto (Silva, 2003), especialmente em solos argilosos. A resposta à compactação das principais plantas cultivadas ainda não está completamente conhecida. Os estudos realizados para obter a resposta das plantas a diferentes estados de compactação, normalmente, têm sido feitos em vasos ou representam um levantamento de determinado estado de compactação no campo e seu efeito sobre a cultura implantada nesse solo.

Segundo Negi et al. (1980) e Hakansson & Voorhees (1997), a compactação do solo leva ao aumento da densidade do solo, aumento da resistência à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de calor, além de afetar diversos atributos do solo como a condutividade hidráulica, permeabilidade do solo, infiltração da água e outras características ligadas à porosidade. A penetração radicular diminui com o aumento da densidade para um determinado potencial da água no solo e, a uma mesma densidade, a penetração diminui com a diminuição da umidade (Taylor & Gardner, 1963).

Dentre os efeitos da compactação nos atributos físicos do solo, destacam-se o aumento da densidade e da resistência do solo e a redução da porosidade e da permeabilidade do solo (Soane & Ouwkerk, 1994). A resistência do solo à penetração das raízes é um atributo físico do solo que afeta diretamente o

crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. Vários pesquisadores utilizam a resistência do solo à penetração para avaliar efeitos dos sistemas de manejo do solo no ambiente radicular (Bengough & Mullins, 1990; Tormena & Roloff, 1996). Barley (1963) afirma que a resistência do solo é o fator que controla o crescimento das raízes. A diminuição do teor de água aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que as raízes em expansão experimentem um impedimento mecânico cada vez maior.

Segundo Taylor & Brar (1991), os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Em Latossolo Vermelho, Petter (1990) verificou que a resistência de 2800 kPa foi limitante ao crescimento radicular da soja. Fernandez et al. (1995) encontraram inibição completa do crescimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho Escuro, textura média, a partir de 1,52 g cm⁻³ de densidade do solo e 0,5 MPa de resistência à penetração. Nesmith (1987) adotou o valor de 2000 kPa como limite crítico de resistência para a penetração de raízes.

Em função da resistência à penetração estar diretamente relacionada à umidade do solo, apresentando relação inversa, tem sido bastante difícil estabelecer, no campo, os valores críticos de resistência, em função do processo de umedecimento e secagem do solo que alteram rapidamente de uma possível condição limitante para não limitante, em termos de resistência mecânica.

Quanto à porosidade de aeração, Taylor (1974) afirma que as necessidades variam com a espécie vegetal; entretanto, como regra geral, Sojka (1992), sugere que uma porosidade de aeração inferior a 10 % seria limitante para o desenvolvimento da maioria das espécies.

Segundo Kondo & Dias Junior (1999), um dos grandes entraves à mecanização intensiva do solo refere-se à sua suscetibilidade à compactação, que se torna crítica em condições de umidade excessiva. A determinação da curva de compressão é a base necessária para esse entendimento, a qual representa graficamente a relação entre o índice de vazios e o logaritmo da pressão aplicada e faz previsão de prejuízo à estrutura do solo quando as pressões aplicadas excederem a capacidade suporte do mesmo.

Portanto, fica difícil determinar se o estado de compactação do solo é crítico ou não. Daí a necessidade de buscar maiores informações e correlacioná-las com o

desenvolvimento das culturas. Portanto, se o estado físico do solo pode afetar o desenvolvimento das culturas, poderá afetar também seus mecanismos de crescimento e desenvolvimento.

Nesse sentido, este trabalho objetivou avaliar, na cultura do feijoeiro e cultivada em Latossolo argiloso, a relação entre o tráfego de máquinas em plantio direto e o preparo do solo sobre as propriedades físicas do solo; a relação desse tráfego com alguns parâmetros que descrevem o crescimento e o desenvolvimento das plantas, tais como a área foliar, a produtividade e o crescimento das raízes quando submetidas a níveis de compactação imediata, sob plantio direto; e a produtividade do trigo cultivado em sucessão ao feijão, para verificar os efeitos residuais da compactação.

6.2. Material e Métodos

O experimento foi instalado na área do “campo experimental da Agronomia” da UNICRUZ, no município de Cruz Alta no Rio Grande do Sul. O solo foi um Latossolo Vermelho, com 607 g kg⁻¹ de argila, 176 g kg⁻¹ de silte e 217 g kg⁻¹ de areia nos primeiros 48 cm. A área utilizada para o experimento num total de 2500 m² foi dividida em 9 parcelas iguais de 16,67 X 16,67 m, e vinha sendo cultivada há mais de 6 anos com o sistema plantio direto, empregando sucessão de soja ou milho no verão e aveia ou trigo no inverno.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições, e os tratamentos foram diferenciados em níveis de compactação: PDc - Plantio Direto sobre compactação adicional que visou aumentar o estado de compactação da área; PD - Plantio Direto sobre a condição atual que reflete o histórico das pressões aplicadas pelo manejo de seis anos de plantio direto e Esc - Plantio sobre área escarificada, que buscou reduzir a compactação atual.

No PDc, a compactação adicional das parcelas foi obtida por quatro passadas paralelas e sobrepostas de uma pá-carregadeira articulada, *CATERPILAR 966*, com rodado de pneus, com massa total de 16,6 Mg. A máquina trafegou por toda parcela de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si, sendo que as passadas eram sobrepostas as anteriores de forma que toda área fosse igualmente trafegada. A escarificação foi realizada com um escarificador de sete hastes até uma

profundidade de 25 cm e, após, efetuou-se o nivelamento superficial do terreno com o uso de uma grade de 36 discos.

Em área dessecada, foi realizada a semeadura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.; cv. FT Bionobre) no dia 15 de janeiro de 2003. A densidade de semeadura foi de 250 mil plantas por ha, com espaçamento entre linhas de 45 cm. Em maio de 2003, sucedendo a cultura de verão, foi semeado trigo BRS 179, com densidade de semeadura de 330 sementes por m². A semeadura das culturas foi realizada com uma semeadora-adubadora de discos.

Para a determinação das densidades e porosidades do solo, foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros metálicos com 5,36 cm de diâmetro e 3 cm de altura, em cinco profundidades, a saber: 0 a 3; 5 a 8; 10 a 13; 20 a 23 e 30 a 33 cm. A determinação da densidade seguiu a metodologia descrita em EMBRAPA (1979). As porosidades foram determinadas conforme Oliveira (1968).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada usando-se um penetrômetro de taxa constante de penetração, com armazenamento eletrônico dos dados possuindo ponta cônica com ângulo de penetração de 30^o e 12,83 mm de diâmetro da base do cone (Collares et al., 2004). As medidas foram realizadas em cada parcela, repetindo a penetração da haste do penetrômetro em três distintos pontos escolhidos ao acaso, até os 60 cm sendo que as leituras eram registradas a cada 0,15 cm de profundidade. Foi usada a média das nove medidas para graficar a RP em relação à profundidade de penetração da haste no solo, para cada tratamento.

Simultaneamente à determinação da resistência a penetração foi medida a umidade do solo, utilizando a reflectometria de domínio do tempo, sendo que o aparelho TDR era portátil da Soil Moisture. Os sensores do TDR tiveram sua base confeccionada em fibra (tecnil), suporte de duas hastes metálicas de aço inox com 23 cm de comprimento, conectadas entre si e ao aparelho por meio de cabo coaxial. As hastes foram inseridas no solo, com inclinação tal que integrasse uma área de acordo com as profundidades de 0 a 6; 6 a 12; 12 a 24 e 24 a 48 cm. Foi feita a calibração do TDR para o solo local, ajustando-se uma função, conforme sugerido por Topp et al. (1980), com a qual se obteve a umidade volumétrica (θ). A equação 1 expressa o ajuste:

$$\theta = 13,8523 + 1,4462 *ka - 0,0389 * ka^2 + 0,0010719 * ka^3 \quad (1)$$

onde :

$$ka = (t * c / L)^2;$$

θ é a umidade volumétrica do solo em $m^3 m^{-3}$;

ka é a constante dielétrica aparente do solo;

t é o tempo de propagação da onda eletromagnética na haste metálica, em nanosegundos;

c é a velocidade de propagação da onda ($30 \times 10^9 \text{ cm s}^{-1}$) e,

L é o comprimento da haste metálica em cm.

Para relacionar o efeito da compactação nas plantas, foram avaliados alguns parâmetros das plantas que poderiam ser afetados pelas variações impostas pelos distintos manejos aplicados, considerando que os maiores efeitos da compactação estão associados à deficiência hídrica no pleno desenvolvimento e crescimento. Foram selecionadas cinco plantas por parcela e realizadas medidas semanais da altura de plantas e expansão das folhas, através da medida do comprimento e da largura das folhas para inferir sobre a área foliar. Na maturação fisiológica, avaliou-se a produtividade das culturas, efetuando a colheita de uma área representativa em cada parcela experimental.

Quando a cultura se encontrava em plena floração, fez-se a avaliação do desenvolvimento e da distribuição do sistema radicular nos diferentes tratamentos, usando o método do perfil cultural descrito por Böhm (1979). Para caracterizar o volume de solo explorado pelo sistema radicular e o encontro do sistema radicular com camadas de impedimento mecânico, a distribuição do sistema radicular das plantas foi observada através da abertura de uma trincheira transversal a uma linha de cultivo, expondo a raiz de uma planta escolhida aleatoriamente de maneira que representasse o conjunto de plantas da parcela experimental. Após a exposição da raiz em uma secção transversal à linha de cultivo e próxima ao eixo da planta, com auxílio de uma malha de 50 x 30 cm, dividida em quadrículas de 5 cm, que foi colocada em pleno contato com o solo, efetuou-se o desenho do formato natural em que se encontrava o sistema radicular nesse momento, obtendo-se o perfil cultural do feijoeiro. Essas avaliações foram feitas próximas a fase de floração.

A produtividade das plantas foi avaliada quando as plantas estavam no estágio de maturação fisiológica, em cada parcela, mediante colheita de plantas em duas áreas representativas de cada parcela experimental e essas com área de 8,10 m² para o feijão e 2,89 m² para o trigo. Os resultados foram corrigidos para umidade de 13 % e expressados em kg ha⁻¹.

As comparações de médias entre os distintos manejos de solo adotado foram realizadas pelo teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) com probabilidade de erro de 5 %, utilizando o programa estatístico SAS (Statistical Analysis System, 2001).

6.3. Resultados e Discussão

A maior densidade do solo foi observada no plantio direto com compactação adicional, mas não diferiu estatisticamente dos demais tratamentos (Figura 2). O efeito da escarificação na redução da densidade do solo praticamente desapareceu no tempo entre a aplicação do tratamento e as determinações, sessenta dias após. Apesar de não significativa, o valor de densidade para o tratamento com compactação adicional foi numericamente superior na camada de solo de 5 a 23 cm, em relação ao escarificado e ao tratamento que possui histórico de pressões aplicadas pelo tráfego por seis anos.

Há tendência de aumento na microporosidade e redução na macroporosidade no PDc, sendo que a camada de 5 a 23 cm apresentou maior diferença. No tratamento com compactação adicional os valores de macroporosidade foram superiores a 10% até a camada de 23 cm, indicando prováveis limitações no arejamento do solo em épocas mais úmidas.

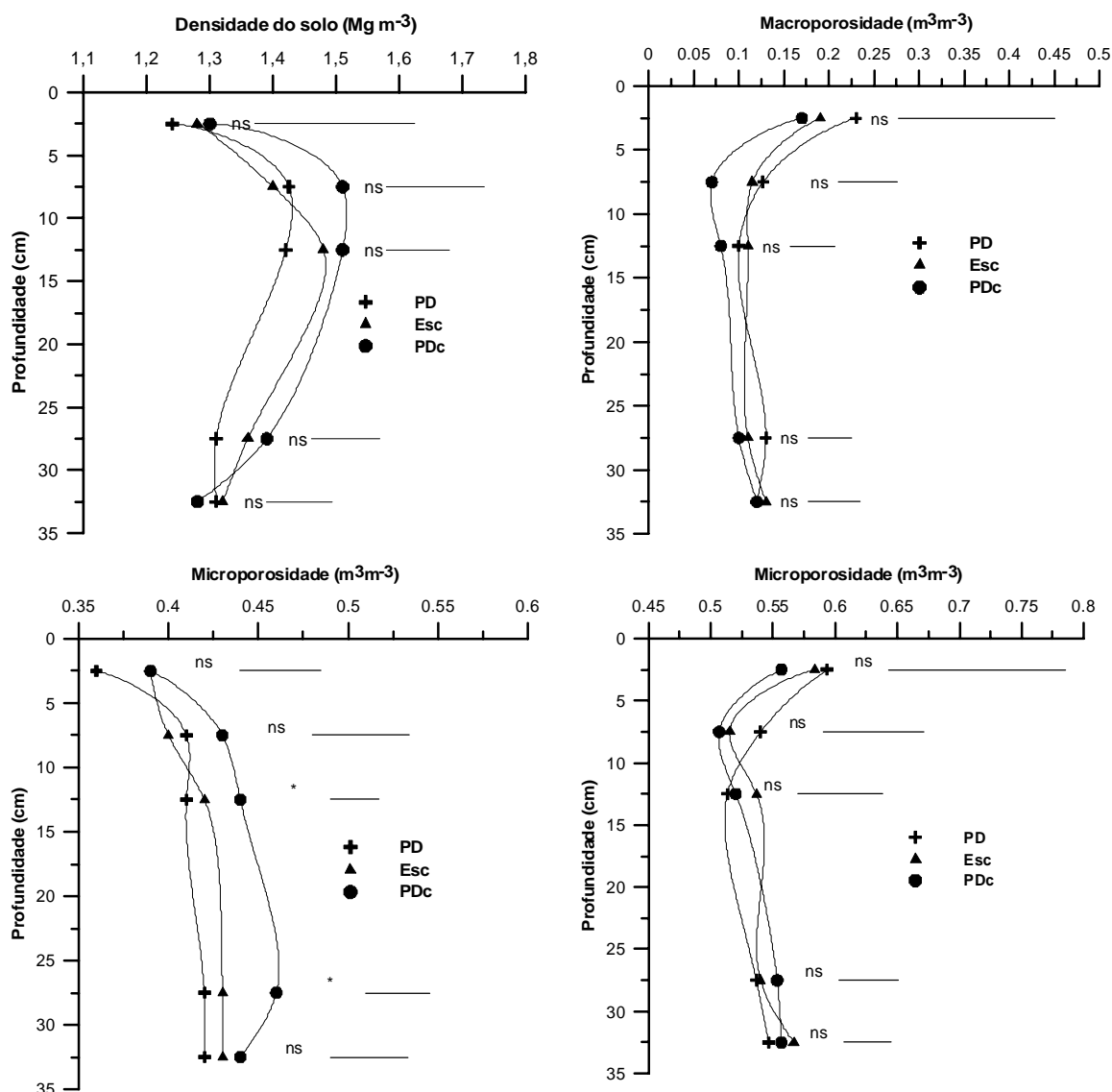


FIGURA 2 - Valores da densidade do solo e relações de porosidades na profundidade para os tratamentos PDc, com compactação adicional, Escarificado e PD, sem compactação adicional, em 13/03/2003.

A umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura (Figura 3), teve uma ampla faixa de variação, principalmente nas camadas superficiais. O A maior microporosidade observada no PDc influiu positivamente na umidade, principalmente nas camadas superficiais, diferenciando-se do Esc que até 12 cm reteve menos água, embora a diferença tenha sido significativa somente para a primeira camada. Isso pode ser explicado pelo aumento da macroporosidade em relação aos demais tratamentos. Nas camadas mais profundas as diferenças foram menores e a escarificação proporcionou maiores teores de umidade.

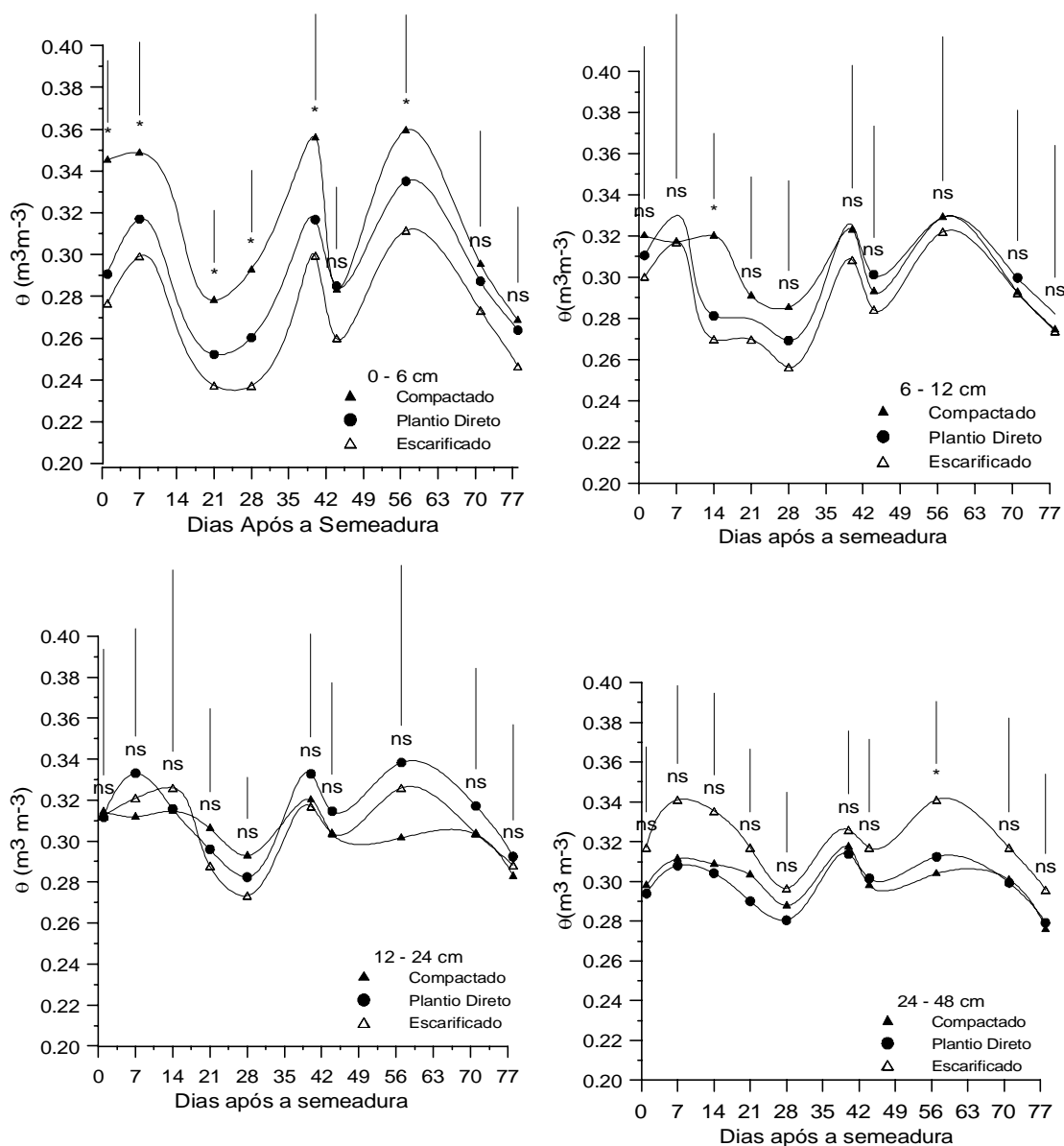


FIGURA 3 –Variação da umidade volumétrica em diferentes profundidades do solo ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro. Barras verticais comparam valores de θ pelo teste DMS a 5%.

A resistência à penetração foi maior que 2 MPa nos períodos mais secos, que é considerada crítica para as plantas (Taylor,1966). Os maiores valores ocorreram principalmente nas camadas superficiais, nos tratamentos PDC e no Plantio Direto (Figura 4). Até os 25 cm a escarificação foi eficiente na diminuição da resistência à penetração, sendo sempre menor que 2 MPa, o que pôde proporcionar melhor crescimento de raízes.

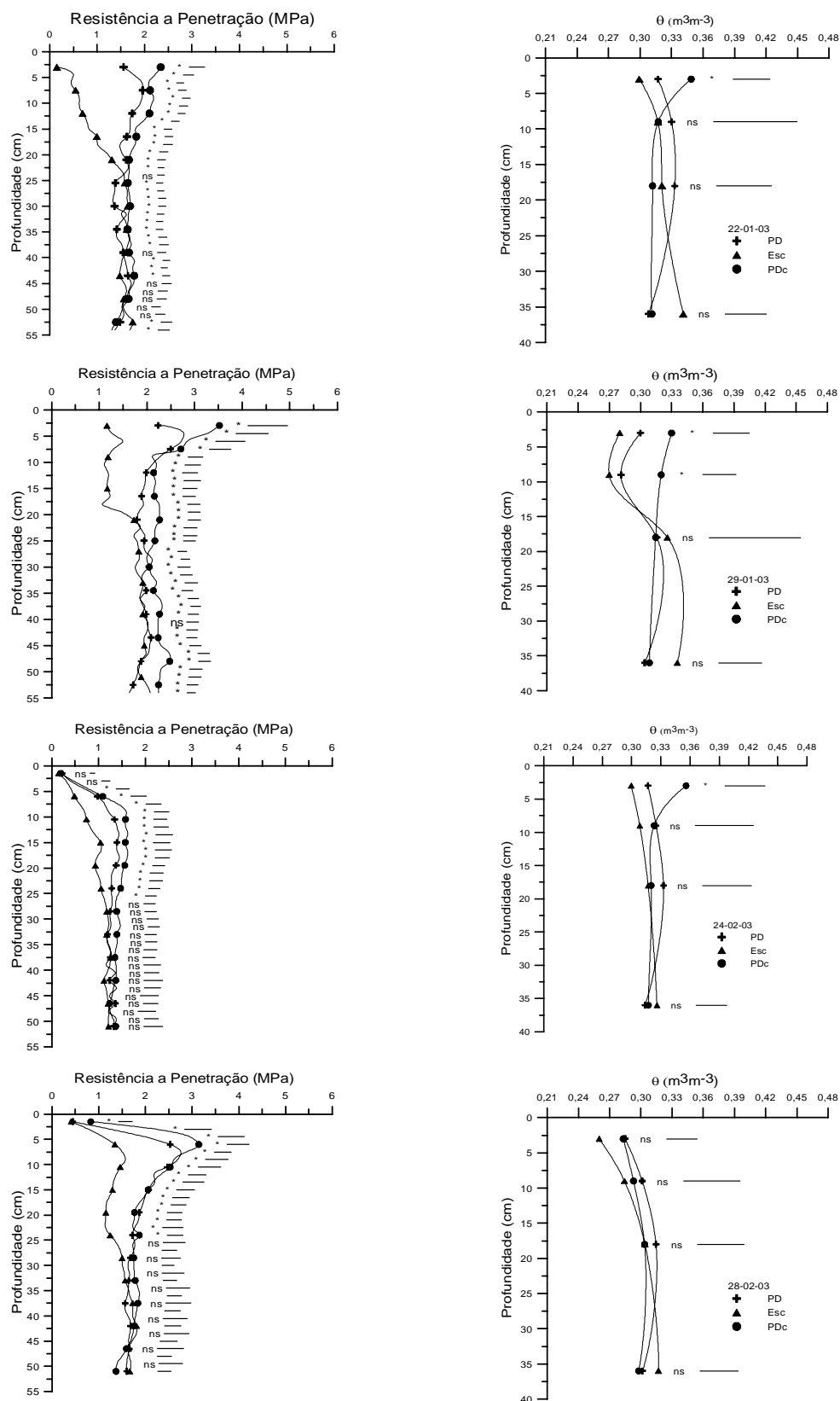


FIGURA 4 - Resistência a penetração e respectiva umidade do solo (θ), para cinco datas durante o ciclo da cultura. Barras horizontais comparam os valores de RP e θ , por profundidade, pelo teste DMS (5%).

No tratamento com compactação adicional a densidade do solo e a resistência à penetração foram maiores, na camada superficial, até os 10 cm, reduzindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade, o que manteve a umidade maior na superfície. Mesmo com umidade próximo a $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as observações do dia 22/01, mostraram que a RP no tratamento compactado estava acima de 2 MPa até os 12,5 cm de profundidade. À medida que decresceu a umidade, entre 0,30 e $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, somente no tratamento escarificado a RP era menor que 2 MPa até os 12,5 cm (dia 29/01). Após experimentar situações de secagem e umedecimento do solo, associado com a consolidação da estrutura pelo desenvolvimento radicular a RP aos 40 DAS (24/02) não foi restritiva em nenhum dos tratamentos, sempre abaixo de 2MPa e, para valores de umidade menores que $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (28/02), a RP na camada até 12,5 cm foi superior a 2 MPa para o PDc e PD.

A variação da umidade do solo durante o ciclo do feijoeiro foi responsável pelas restrições experimentadas pelas plantas e, a RP, tanto nos tratamentos PD e PDc, estava intimamente relacionada com essa variação, de acordo com Cassel, (1985) que afirma que a resistência a penetração tem relações com a mineralogia, densidade, textura, estrutura e conteúdo de água e matéria orgânica. O PD apresenta um alto estado de compactação na área avaliada e a escarificação mostrou-se eficiente em diminuir os efeitos negativos da compactação, até os 25 cm de profundidade. A escarificação aumentou a macroporosidade, permitindo melhor aeração e proporcionou menor resistência à penetração ao longo do ciclo da cultura.

Devido às flutuações de umidade e resistência, as raízes das plantas tiveram o seu crescimento restringido. Nos tratamentos que receberam compactação adicional o crescimento radicular foi menos vigoroso e se concentrou nas camadas superficiais, com indícios claros de deformação (Figura 5). A raiz principal apresentou várias ramificações nas primeiras camadas de solo. A concentração de raízes foi evidente até os 10 cm de profundidade e as raras raízes observadas na próxima camada cresceram entre as camadas compactadas não conseguindo penetrar na zona compactada. No tratamento que não recebeu compactação adicional as raízes atingiram maiores profundidades e tiveram um melhor desenvolvimento e distribuição no solo. Mesmo com os severos estados de compactação, foi possível observar o surgimento significativo de raízes secundárias, na forma de finas franjas, se desenvolvendo entre as fraturas formadas pela sobreposição de camadas compactadas. Esse mecanismo de adaptação às

condições adversas, pode ser responsável pelo crescimento e desenvolvimento de plantas em locais onde as propriedades físicas são consideradas limitantes ou restritivas.

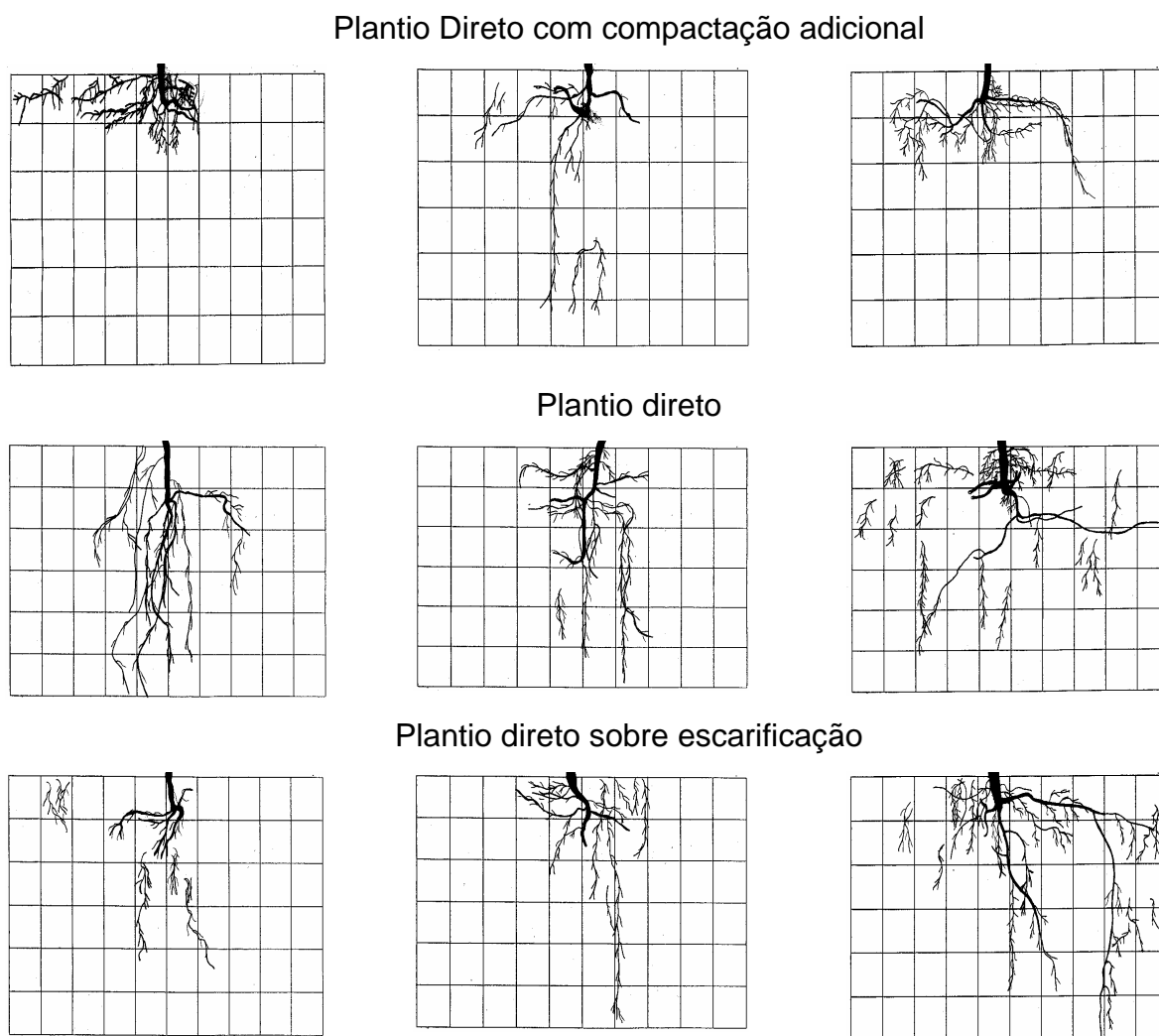


FIGURA 5 – Distribuição radicular do feijoeiro em diferentes níveis de manejo, observada no perfil cultural (50 x 30 cm) para os distintos tratamentos, onde a dimensão da quadrícula é de 5 x 5 cm.

Em resposta a restrição radicular que diminuiu o acesso à água e nutrientes, as plantas tiveram um menor desenvolvimento da sua parte aérea (Figura 6), mesmo não sendo significativa aos 42 DAS observações locais mostraram que o crescimento das plantas foi restringido pela compactação e a redução de produtividade, no tratamento que recebeu compactação adicional pelo tráfego deve

ter relação direta com os parâmetros de crescimentos. No PDc, aos 28 DAS, a área foliar foi significativamente menor em relação aos demais tratamentos.

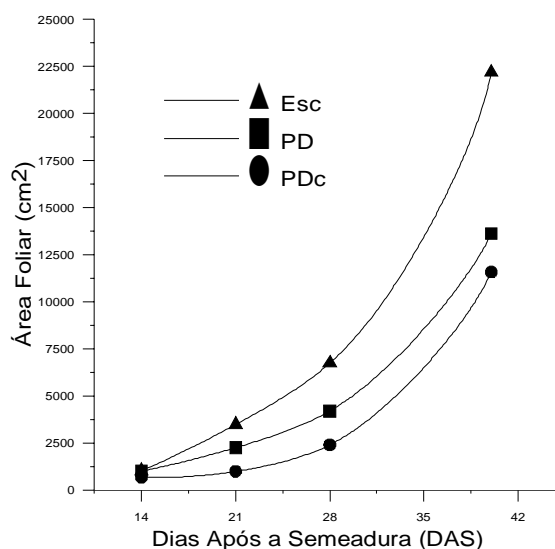


FIGURA 6 - Variação da área foliar do feijoeiro ao longo do ciclo da cultura.

O estado de compactação criado por quatro passadas de máquina reduziu a produtividade do feijoeiro em 17% e do trigo em 14 % se comparado ao Plantio direto sem compactação adicional, e a escarificação apresentou uma redução de produtividade de 4% para o feijoeiro e 6,5 % para o trigo (Tabela 5).

O feijoeiro sofreu grande influência da compactação do solo, com isso o sistema radicular principal experimentou impedimentos nas camadas superficiais e, desta forma o crescimento e produtividade ficaram limitados pela compactação adicional ao solo. Com produtividade média de 48 sacos por hectare, semelhante ao obtido no tratamento PD, a compactação severa diminuiu em torno de 8 sacos por hectare a produtividade do feijoeiro. No entanto a escarificação não reduziu os efeitos da compactação causada pelo plantio direto por seis sucessivos anos e os resultados mostraram que a produtividade foi ainda menor em 2 sacos por hectare que a alcançada pelo sistema de plantio direto, não justificando a adoção desse manejo como forma de minimizar efeitos negativos da compactação, quando o solo apresenta indicadores de compactação semelhantes ao observado. Baseado nisso os valores de densidade solo, restritivos a produtividade, deve ser maior que $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ e menor que $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$.

TABELA 5 – Produtividade da cultura do feijoeiro e do trigo cultivados em plantio direto com e sem compactação adicional e escarificado.

Tratamentos	Produtividade de Grãos		Produtividade Relativa	
Mg ha ⁻¹%.....	
	Feijão	Trigo	Feijão	Trigo
PDC	2,382b	2,911	83,73	86,35
PD	2,879a	3,371	100,00	100,00
Esc	2,762ab	3,151	95,93	93,47

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

A produtividade apresentada pelo trigo cultivado em sucessão ao feijoeiro confirma os resultados encontrados para a cultura antecessora, podendo inferir que a compactação imposta ao solo, antes do cultivo de feijão refletiu seus efeitos mesmo após dois ciclos de cultivo.

6.4. Conclusões

O desenvolvimento radicular e a área foliar do feijoeiro foram afetados pela compactação adicional refletindo na redução da produtividade.

A compactação adicional reduziu a produtividade do feijoeiro em 8 sacos por hectare, comparado ao plantio direto sem compactação adicional.

A escarificação do solo que não foi eficaz em diminuir os efeitos da compactação do solo causada por seis anos de plantio direto e, pois não foi capaz de aumentar a produtividade do feijoeiro nem foi positiva nos parâmetros de crescimento.

A densidade do solo restritiva a produtividade do feijão e do trigo foi de 1,4 a 1,5 Mg m⁻³.

6.5. Literatura Citada

BARLEY, K.P. Influence of soil strength on growth of roots. **Soil Science**, v.96, p.175-180, 1963.

BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v.41, p.341-58, 1990.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag BerlinHeidelberg, 1979. 190p.

CARVALHO JÚNIOR, I.A., FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 505-514, 1998.

CASSEL, D.K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In: UNGER, P.W.; van DOREM, D.M. eds. **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: American Society of Agronomy, 1985. 198p

COGO, N.P., DREWS, C.R.; GIANELLO, C. Índice de erosividade das chuvas dos municípios de Guaíba, Ijuí e Passo Fundo, no Estado do Rio Grande do Sul. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., 1978, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, CNPTrigo, 1978. p.145-152.

COLLARES, G.C., REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Desenvolvimento e funcionalidade de um penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004. (CD-ROM)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, 1979.

HAKANSSON, I, VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, v.11, p.239-282, 1988.

HAKANSSON, I.; VOORHESS, W.B. Soil compactation. In: LAL,R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C.; STEWART, B.A., eds. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. p.167-179.

HERNANI, L.C.; SALTON, J.C. O CPAO e o sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 45, p. 27-33, 1998.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo, provocados pela compactação**. 1996. 153f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo, 1996.

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 130 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

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

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

NEGI, S.C.; McKYES, E.; TAYLOR, F.; DOUGLAS, E.; RAGHAVAN, G.S.V. Crop performance as affected by traffic and tillage in a clay soil. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.23, p.1364-1368, 1980.

NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultisol. **Soil Science Society of American Journal**, v.51, p.183-6, 1987.

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p. 197-200, 1968

PETTER, R.L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - área de concentração Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

REINERT, D. J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf.**, 1990. 128f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, Michigan, 1990.

SILVA, V.R da. **Propriedades Físicas e Hídricas em Solos sob Diferentes Estados de Compactação**. 2003. 171f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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

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, 1994. p.01-21.

SOJKA, R.E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science Society of American Journal**, v.154, p.269-280, 1992.

STATICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS. **SAS/STAT Procedure guide for personal computers**. Version 5, SAS Inst. Cary,1998.

TAVARES FILHO, J., RALISCH, R., GUIMARÃES, M.F., MEDINA, C.C., BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.393-399, 1999.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**, v.96, p.153-156, 1963.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, v.19, p.111-119, 1991.

TOPP,G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.571-582, 1980.

TORMENA, C.A., ROLOFF, G. Dinâmica da resistência á penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.333-9, 1996.

7. CAPÍTULO 3

EFEITOS DA COMPACTAÇÃO RESIDUAL E IMEDIATA NO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO EM ARGISSOLO DA DEPRESSÃO CENTRAL DO RS

7.1. Introdução

A agricultura moderna promoveu um aumento no uso de máquinas e implementos agrícolas, que se tornaram mais acessíveis aos produtores, acarretando, com isso, uma intensificação do uso do solo. O intenso tráfego de máquinas em operações de manejo do solo, tais como semeadura, tratamentos culturais e colheita, aliado ao emprego do plantio direto, amplamente difundido nos modelos produtivos atuais, aplicados, às vezes, com o desconhecimento da capacidade de suporte e umidade do solo no momento das operações, promove a compactação do solo e, como consequência, outros problemas de ordem física, que se somam em sucessivos anos de cultivo dos solos agrícolas.

Os sistemas de manejo buscam melhorar as condições para o desenvolvimento das culturas, desde a fase de germinação até a colheita. O início da germinação é determinado, principalmente, pela umidade disponível no solo. A temperatura do solo, a disponibilidade de oxigênio e a luminosidade também são fatores determinantes e, freqüentemente, o começo do processo é determinado pela interação desses fatores (Hartmann & Kester, 1971).

O sistema plantio direto é um processo eficiente no controle e prevenção da erosão do solo, permitindo a melhoria na infiltração de água e no movimento de nutrientes no solo, quando comparado com o sistema convencional, mas o manejo inadequado desse sistema e o sistemático tráfego de máquinas promovem a compactação superficial e subsuperficial do solo. Segundo Negi et al. (1980) e Arvidson & Hakansson (1991), a compactação do solo causa aumento da densidade do solo, da resistência à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de calor, além de afetar diversos atributos do solo como a condutividade hidráulica, permeabilidade do solo, infiltração da água e outras características

ligadas à porosidade. A penetração radicular diminui com o aumento da densidade do solo para um determinado potencial da água e, a uma mesma densidade, a penetração diminui com a diminuição da umidade (Taylor & Gardner, 1963) e a resistência do solo é o fator que controla o crescimento das raízes (Barley, 1963). As raízes crescem nos espaços vazios do solo, nos macroporos, nas fendas e orifícios presentes. Quando a macroporosidade é diminuída, a ponto do tamanho de poros ser menor que o diâmetro das raízes, o crescimento somente é possível se a pressão exercida pelas raízes for maior que a resistência imposta pelo solo ao crescimento. A diminuição do conteúdo de água aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que as raízes em expansão experimentem impedimento mecânico cada vez maior.

Continuados processos de umedecimento e secagem promovem alteração na densidade e na resistência mecânica à penetração de raízes. No umedecimento a água facilita o deslocamento entre as partículas do solo, propiciando um ambiente favorável ao crescimento de raízes. Quando diminui a umidade do solo, o efeito lubrificante da água entre as partículas do solo cessa e, com isso, aumenta a pressão a ser exercida para expansão radicular, até a ocorrência de situações considerada limitantes ao crescimento. A compactação promove o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração que, quanto menor a umidade, maior será os efeitos negativos desse processo. As plantas são capazes de detectar condições impeditivas ao crescimento de raízes, evidenciadas pela diminuição da expansão foliar.

As limitações ao crescimento e desenvolvimento das plantas causadas direta ou indiretamente, pela dinâmica de variação dos atributos do solo frente aos processos naturais ou provocados pelo inadequado manejo da agricultura, remete ao decréscimo da produtividade dos cultivos agrícolas, pois mesmo que o comportamento dos vegetais esteja associado aos mecanismos de adaptação às adversidades ambientais, os condicionantes impostos pelas propriedades físicas dos solos alcançam situações críticas e até impeditivas do crescimento. Tal situação aponta para que os processos que envolvem o manejo de plantas submetidas às variações ambientais, especificamente a compactação do solo, sejam estudadas, integrando os atributos do solo, seus efeitos e suas relações com o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Portanto, se a compactação altera o estado físico do solo e afeta o crescimento e desenvolvimento das culturas, convém que sejam ampliados esforços no sentido de alimentar de dados e respostas à comunidade agrícola para que se adotem estratégias de uso da terra e da água no sentido de minimizar os seus efeitos.

Nesse sentido, este trabalho objetivou avaliar, com a cultura do feijoeiro, alguns parâmetros que descrevem o crescimento e o desenvolvimento das plantas, tais como a emergência, a área foliar e a produtividade, quando submetidas a níveis de compactação residual e imediata, sob plantio direto e com o manejo de solo escarificado, observando o comportamento de alguns atributos físico-hídricos do solo.

7.2. Material e Métodos

Os experimentos foram conduzidos na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, RS, localizado na região fisiográfica da Depressão Central do estado do RS, latitude 29°41' Sul, longitude de 53°48' Oeste e altitude de 95 metros.

O clima enquadra-se na classificação "Cfa" de Köppen, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (Moreno, 1961). O solo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (Typic Hapludalf).

Foram estabelecidos três experimentos, com delineamento experimental em blocos ao acaso, sendo que cada um contava com três tratamentos e quatro repetições. Os experimentos simularam condições extremas impostas pelo manejo do solo quando trafegado intensamente nas condições de plantio direto. As supostas condições limitantes foram através de três experimentos a saber:

- Experimento 1: comparação do residual de compactação aplicada por 4 passadas de máquina de 10 Mg em ano anterior, escarificação e gradagem e residual histórico da compactação provocada por 12 anos de manejo em plantio direto.
- Experimento 2: comparação da compactação adicional com máquina de 9 Mg sobre residual de compactação aplicada por 4 passadas de máquina de 10 Mg

em ano anterior, escarificação e gradagem em residual de compactação adicional de 2 passadas de máquina de 10 Mg e residual histórico da compactação provocada por 12 anos de manejo em plantio direto.

- Experimento 3: comparação da compactação imediata aplicada, por máquina de 9 Mg, escarificação e gradagem e residual histórico da compactação provocada por 12 anos de manejo em plantio direto.

Os tratamentos foram estabelecidos em parcelas experimentais de 7 x 6 metros, definidos como: T1 - plantio direto sem compactação adicional imediata, considerando a compactação presente, T2 – plantio direto em área submetida a escarificação e gradagem, e T3 - plantio direto com compactação adicional imediata ou sob residual de compactação adicional no ano anterior.

O Experimento 1 foi conduzido sobre área em que no ano anterior foi cultivada com soja manejada sob distintos níveis de compactação e os tratamentos diferiram em relação ao manejo do solo e, nesse caso, considerou-se como T1 aquele sob compactação residual, sem compactação adicional imediata, o T2 sob escarificação e gradagem e o T3 considerando o resíduo da compactação adicional aplicada no ano anterior.

O Experimento 2 também foi conduzido em área que no ano anterior foi cultivado com feijão e submetido aos mesmos tratamentos do primeiro; no entanto, o T3 recebeu aplicação de compactação imediata, buscando inferir ao solo uma situação ainda mais limitante causada pela compactação.

O Experimento 3 foi implantado em ambiente contíguo aos experimentos anteriores, sobre área manejada sob plantio direto em anos anteriores, sem compactação adicional aplicada. Nesse caso, o T1, reflete o histórico das pressões sofridas pelo solo em anos anteriores, principalmente pelas operações de semeadura e colheita, no T2 a redução dessa compactação através da escarificação e gradagem, e no T3 as parcelas foram submetidas à compactação imediata, aumentando o estado de compactação presente na área.

As parcelas experimentais, que compõem os três experimentos, estavam alinhadas num mesmo sentido, dispostas em uma faixa entre terraços da coxilha situada na área experimental, denominada de faixa 1 por Albuquerque (1993), que caracteriza, descreve e localiza na paisagem o ambiente em questão. Os experimentos e tratamentos aplicados no ano anterior estão detalhados em Streck (2004).

A compactação adicional no solo foi obtida pelo trânsito de uma máquina pá-carregadeira, Marca CLARCK - MICHIGAN 75III, com massa de 7,736 Mg e com a concha repleta com pedra britada nº 1 para, dessa forma, aumentar a massa no eixo frontal do equipamento e garantir a distribuição uniforme da massa total de 9,046 Mg. Os pneus eram PIRELLI, *PN 14 G2/L2, 13.00-24 10PR*, com 33 cm de largura e 105 cm de diâmetro. As garradeiras estavam desgastadas pelo uso, evitando assim o cisalhamento superficial. Toda a parcela foi trafegada de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si e as passadas foram sobrepostas às anteriores de forma que toda área fosse igualmente trafegada. A escarificação foi realizada através de um escarificador de quatro hastes, manejando posteriormente o solo com uma grade de 36 discos.

A área utilizada para o experimento vinha sendo cultivada a 12 anos em sistema de plantio direto em sucessão cultural de aveia preta (*Avena strigosa* Schieb) no inverno e soja (*Glycine max* L.) ou milho (*Zea mays* L.) no verão. No momento da aplicação dos tratamentos, a área se encontrava cultivada com a aveia preta, a qual foi dessecada na fase de pleno florescimento.

Nos três experimentos foi cultivado feijão preto (*Phaseolis vulgaris*), cultivar FT BIO NOBRE, tipo III. A semeadura foi realizada no dia 16 de dezembro de 2002, com espaçamento entre linhas de 0,45 m com 13 sementes por metro linear, com densidade de 250 mil plantas por hectare. A adubação de base foi de 400 kg ha⁻¹ da fórmula 5-20-20 e uréia foi aplicada em cobertura quando as plantas atingiram 6 a 8 folhas. Durante a condução dos experimentos, realizaram-se os controles fitossanitários necessários.

Para a determinação da densidade do solo e relações de porosidade, foram coletadas amostras não deformadas de solo nas camadas de 0 - 5, 5 - 10, 10 - 15, 15 - 20, 20 - 25, 25 - 30, 30 - 35 e 35 - 40 cm de profundidade, através de anéis volumétricos metálicos de 5,3 cm de diâmetro e 3,0 cm de altura. Nas mesmas camadas foram coletadas amostras de solo deformadas para caracterização textural e demais determinações. As amostras, seguindo as prerrogativas metodológicas, foram devidamente acondicionadas e transportadas ao laboratório onde foram de imediato, preparadas e submetidas às análises. A determinação da densidade do solo seguiu a metodologia descrita em EMBRAPA (1979). As porosidades foram determinadas conforme Oliveira (1968).

Determinaram-se para cada camada de solo e cada tratamento, nos três experimentos estudados, as curvas de retenção de água no solo. As mesmas amostras utilizadas na determinação da densidade do solo foram empregadas para a obtenção da curva de retenção de água no solo. As amostras foram submetidas à sucção após lenta e gradual saturação. Para os pontos de baixa tensão (1 a 6 kPa), foram obtidos através da mesa de tensão e para os pontos 33 a 100 kPa foram obtidos em placas de pressão empregando placas porosas de Richard . Para obtenção das tensões de 100 a 1500 kPa, empregaram-se amostras deformadas, das respectivas camadas, as quais foram levadas a câmara de um psicrômetro de ponto de orvalho (“dew point potentiometer”) da Decagon, que geraram curvas de retenção conforme metodologia descrita em Decagon (2002). Os dados de conteúdo de água obtidos em base de massa, umidade gravimétrica, foram multiplicados pela densidade do solo, calculada a partir das amostras com estrutura não deformada das respectivas profundidades, para então obter a umidade volumétrica e, assim, reunir em uma mesma curva os pontos de umidade (θ) x tensão (ψ), da mesa de tensão, do aparelho de placas porosas de Richards e do psicrômetro.

Para ajuste das curvas características de água no solo, foi empregado o modelo sugerido por van Genuchten (1980), mediante programa computacional SWRC software (Dourado Neto et al., 2001), conforme equação 1.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\psi)^n)^m \quad (1)$$

onde:

θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_r = umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

ψ = potencial matricial (kPa);

α , n , e m = parâmetros de ajuste da curva de retenção.

Aos dezessete dias após a emergência (DAE), foram selecionadas três plantas por parcela para as determinações não destrutivas de área foliar e altura de plantas. Para estimativa da área foliar, foram medidos o comprimento e a máxima largura de todos os folíolos das plantas selecionadas. As medidas foram realizadas a

cada três dias até a floração da cultura do feijão. Para a estimativa da área foliar das plantas, coletaram-se várias plantas, representativas das unidades experimentais, selecionando aquelas que continham número expressivo de folíolos e com maior variação de tamanho. As folhas foram estendidas sobre papel e reproduzidas cópias. A partir das cópias reprografadas dos folíolos mediu-se em mesa digitalizadora a área foliar de cada folíolo e com escala os respectivos comprimentos e larguras.

Partindo do comprimento e da maior largura de cada folíolo ajustou-se uma equação de regressão à área foliar medida, empregando para isso algumas interações matemáticas entre os dois parâmetros. A equação potencial $Y = 0,4565 X^{1,0527}$ ($r^2 = 0,9843$), foi aquela que melhor expressou a relação entre o produto do comprimento pela máxima largura dos folíolos de diferentes tamanhos (variável independente) e a área foliar real dos folíolos (variável dependente). Considerou-se área foliar das plantas o somatório das áreas estimadas pela equação para cada folíolo.

A altura das plantas foi determinada pela distância vertical entre a superfície do solo até a inserção do último trifólio vegetativo visível na haste principal da planta.

A emergência foi avaliada pelo método proposto por Popinigis (1985) adaptado as condições locais. Logo após a semeadura do feijão, foi demarcada uma área de um metro quadrado em cada parcela, para acompanhar, através de contagens diárias, as plântulas que emergiam. Para tal foi considerado plântula emergida aquela com altura de 10 mm dos seus cotilédones em relação ao solo, critério esse também utilizado por Helms et al. (1996). A contagem prosseguiu até quando por intervalo de duas contagens não houvesse acréscimo nos números de plântulas emergidas.

Quando a cultura do feijão atingiu a maturação fisiológica, avaliou-se a produtividade, colhendo-se uma área útil de 10,125 m², em cada uma das unidades experimentais, corrigindo-se a umidade dos grãos para 13%.

7.3. Resultados e Discussão

7.3.1 Densidade, porosidades e retenção de água

No experimento 1, o tratamento 1 foi aplicado em área compactada em ano anterior buscando refletir o impacto desse tempo nos atributos do solo. Através da figura 7, pode-se visualizar o comportamento da densidade do solo na camada de 0 a 40 cm de profundidade onde é possível afirmar que o reflexo das pressões aplicadas na obtenção da compactação no ano anterior ainda permanece, pois os valores da densidade do solo foram sempre maiores que $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 5 a 35 cm e, na camada de 15 a 25 cm, excederam a $1,9 \text{ Mg m}^{-3}$. Mesmo o desenvolvimento de plantas e os processos de umedecimento e secagem do solo, aliado às forças da atividade biológica, não foram suficientes para minimizar os efeitos da compactação e realiviar à situação mais favorável ao desenvolvimento de plantas, quando analisado de forma relativa aos atributos do solo. A macroporosidade se manteve entre os valores de $0,08$ a $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, acompanhando a variação dos valores de densidade. Nesse experimento, observa-se que a escarificação promoveu a diminuição dos efeitos da compactação com menores valores de densidade e maior porosidade total, mas não diferiu significativamente em relação ao sistema de plantio direto.

Com a promoção da compactação adicional em parcelas que haviam sido compactadas em anos anteriores, conforme retrata o experimento 2, a densidade atingiu valores no entorno de $1,9 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 5 a 20 cm, refletindo diretamente na macroporosidade que se aproximou dos $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ na profundidade de 5 até 35 cm.

Quando se retrata a condição de compactação imediata ou atual comparada aos efeitos do progresso de pressões causadas por sucessivos 12 anos de cultivo, experimento 3, observa-se que as parcelas compactadas responderam de mesma forma às situações anteriores descritas, embora os valores absolutos tenham sido menores quando comparado aos demais, situando-se no entorno de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$. As diferenças não foram significativas quando comparados aos demais tratamentos na camada de 10 a 40 cm de profundidade. A macroporosidade, sempre maior que $0,10$

Mg m^{-3} , refletiu uma melhor condição física nos tratamentos sob escarificação ou sem compactação adicional.

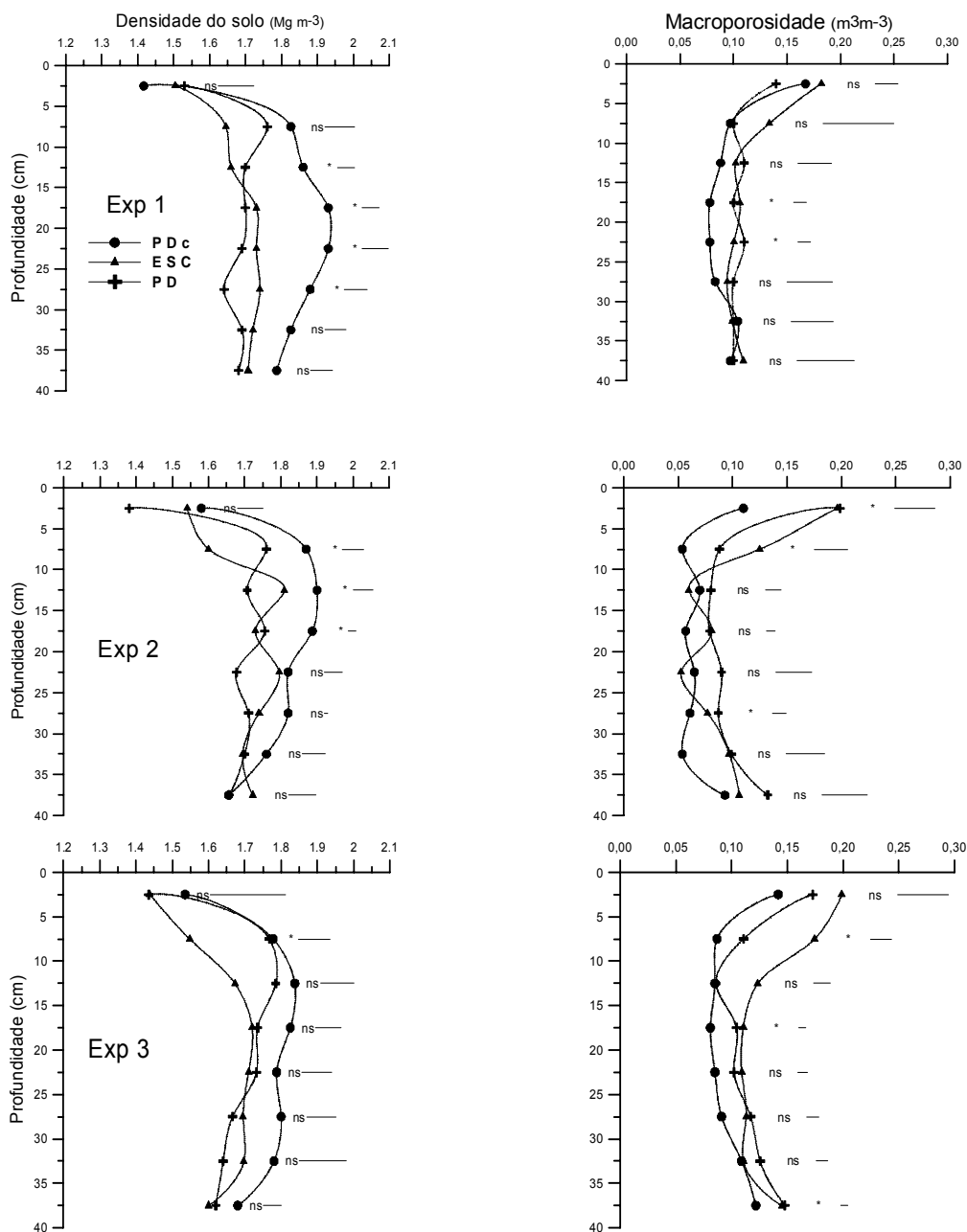


FIGURA 7 - Comportamento da densidade do solo e da macroporosidade em função da profundidade para os experimentos 1, 2 e 3. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade. PD – (T1) plantio direto sem compactação adicional imediata, considerando a compactação presente, ESC – (T2) plantio em área submetida a escarificação e gradagem, e PDc – (T3) plantio direto

com compactação adicional imediata ou sob residual de compactação adicional no ano anterior.

Ao comparar as diferentes situações impostas ao solo aos três experimentos, a julgar pelo comportamento da densidade do solo e pelas relações de macro e microporosidades, bem como os efeitos provocados pela compactação, quer seja pelo: (a) – histórico de cargas aplicadas no ano anterior, (b). pela aplicação de carga sucedendo a aplicação do ano anterior, (c). adição de cargas recentes ou imediatas e (d). histórico de 12 anos de sucessivo cultivo do solo, os efeitos do processo de compactação não foram minimizados considerando o manejo de sucessão das culturas soja-aveia-feijão no período de dois anos agrícolas conforme experimento 1. As cargas aplicadas, mesmo que sucessivamente, não refletiram valores de densidade superiores a $1,9 \text{ Mg m}^{-3}$, excetuando em poucas observações, que pode ter sido função dos níveis de umidade experimentados pelo solo no momento da aplicação das cargas.

A compactação residual do ano anterior causou diferenças significativas da na retenção de água no solo até as tensões de 6 kPa para a camada de 10 a 15 cm e até 33 kPa para a camada de 15 a 20 cm no experimento 1 (Figura 8). A compactação não foi realiviada, afetando a distribuição do tamanho de poros e, portanto, a retenção de água no solo.

Na camada de 15 a 20 cm, observando a curva característica da água no solo, a escarificação foi mais efetiva na promoção da descompactação do solo e menos água ficou retida até a tensão de 33 kPa. Quando o solo recebeu compactação adicional (Experimento 2), a curva de retenção de água no solo indica menores conteúdos de água nas tensões até 33 kPa na camada de 5 a 15 cm de profundidade.

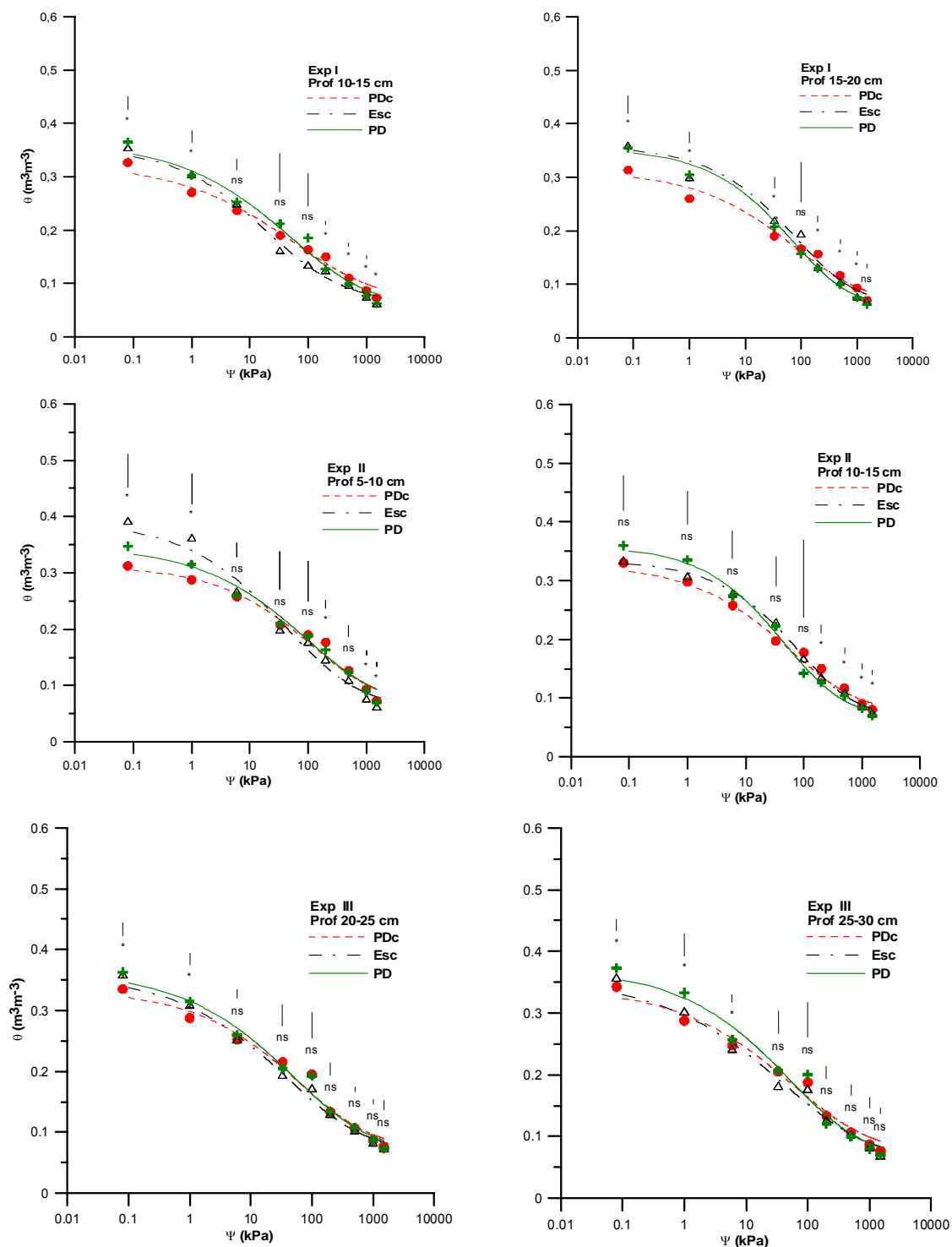


FIGURA 8 - Curva característica da retenção de água no solo em algumas profundidades para os experimentos 1, 2 e 3. θ é o conteúdo volumétrico de água no solo e Ψ é a tensão de água no solo. PD – (T1) plantio direto sem compactação adicional imediata, considerando a compactação presente, ESC – (T2) plantio em área submetida à escarificação e gradagem, e PDc – (T3) plantio direto com compactação adicional imediata ou sob residual de compactação adicional no ano anterior.

Esse efeito negativo da compactação na retenção de água é esperado, embora somente nas camadas mais superficiais seja significativa. A compactação imediata, conforme a estratégia do experimento 3, fez com que camadas mais profundas do solo (de 20 a 30 cm de profundidade) retivessem significativamente menor conteúdo de água quando comparado ao sistema plantio direto e a escarificação, embora a observação do gráfico não expresse diferenças ao solo não mobilizado.

Os efeitos diretos da compactação residual e imediata nos atributos do solo evidenciam a promoção de ambiente que pode ser limitante ao desenvolvimento e crescimento de plantas, pois alterando a densidade e porosidade do solo, que condicionam a retenção de água no solo, indiretamente interferem nos processos fisiológicos das plantas. Em períodos, quando ocorrem chuvas regulares, os efeitos da compactação podem ser negligenciados, tal o grau de dependência do ambiente solo aos fatores climáticos. Apesar das dificuldades, o entendimento do comportamento dos atributos físicos do solo, principalmente umidade e a estrutura do solo, são fundamentais para o entendimento de muitos processos de importância agrícola (Hadas, 1997).

7.3.2. Parâmetros de crescimento e produtividade

Não houve diferença significativa na emergência das plantas do feijoeiro entre os tratamentos nos experimentos 1 e 2. Entretanto, no experimento 3, aos 9 dias após semeadura, observou-se diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 6). Contudo, ao observar apenas os valores de plantas emergidas nos experimentos 1 e 3, no último dia de contagem, percebe-se que existe tendência de maior número de plantas emergidas no T1 (plantio direto sem compactação adicional imediata) em relação ao T3 (plantio direto com compactação adicional imediata). No experimento 2, essa diferença numérica não é observada. O que pode ter ocorrido nesses casos foi o estabelecimento de um ambiente igualmente favorável por ação dos mecanismos sulcadores semeadora.

A altura de plantas no T3 foi significativamente menor que nos demais tratamentos, nos experimentos 2 e 3 (Tabela 7). No experimento 2, a altura de plantas do T3 foi reduzida em 19,6 e 19,1 % em relação ao T1 e T2,

respectivamente. No experimento 3, a compactação adicional reduziu em 14,6 % a altura de plantas em relação ao tratamento escarificado (T2), que apresentou maior altura aos 29 DAE. A altura de plantas é um indicador da restrição ao crescimento das plantas em solos compactados.

A área foliar das plantas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, em nenhum experimento. Entretanto, percebe-se que no tratamento T3, experimento 2 e 3 (Tabela 9), as plantas tiveram crescimento da área foliar mais lento até os 23 DAE, quando comparados aos demais tratamentos (Tabela 8).

TABELA 6 - Emergência das plantas do feijoeiro, nos três experimentos, a partir de 5 dias após a semeadura.

Tratamentos	Média do número de plantas emergidas					
Dias após semeadura.....					
	5	6	7	8	9	10
Experimento 1.....					
T1	12,75 a	24,00 a	28,75 a	34,50 a	34,75 a	35,25 a
T2	7,00 a	19,75 a	24,00 a	29,50 a	30,50 a	31,00 a
T3	11,75 a	18,25 a	23,50 a	25,00 a	24,75 a	27,00 a
Experimento 2.....					
T1	11,25 a	24,50 a	29,00 a	36,50 a	38,00 a	39,25 a
T2	4,00 a	19,75 a	26,50 a	37,00 a	37,00 a	37,50 a
T3	10,50 a	21,00 a	25,50 a	32,00 a	36,00 a	37,00 a
Experimento 3.....					
T1	13,25 a	22 a	27,25 a	33 a	35,5 a	36,5 a
T2	7,75 a	24,25 a	28,75 a	32,5 a	32,5 ab	32,75 a
T3	8,75 a	17 a	21,75 a	23,75 a	26 b	26,25 a

T1 – plantio direto sem compactação adicional; T2 – escarificado; T3 – compactação adicional. Médias na coluna, seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

TABELA 7 - Evolução da altura de plantas do feijoeiro nos experimentos dois e três, no intervalo de treze dias após a emergência.

Tratamentos	Altura de plantas (cm)				
	Dias após emergência.....				
	17	20	23	26	29
.....Experimento 2.....					
T1	30,05 ab	36,16 a	42,75 a	48,98 a	55,27 a
T2	32,46 a	36,73 a	42,30 a	48,34 a	54,98 a
T3	25,87 b	31,42 b	36,20 b	39,35 b	44,43 b
.....Experimento 3.....					
T1	30,62 a	36,95 a	43,17 a	48,67 a	55,17 a
T2	29,62 a	37,43 a	42,75 ab	42,66 a	56,65 a
T3	27,71 b	33,61 a	38,55 b	42,57 b	48,37 b

T1 – plantio direto sem compactação adicional; T2 – escarificado; T3 – compactação adicional. Médias na coluna, seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

TABELA 8 - Área foliar das plantas de feijão dos experimentos dois e três, no intervalo de treze dias após a emergência.

Tratamentos	Área foliar (cm ²)				
	Dias após emergência.....				
	17	20	23	26	29
.....Experimento 2.....					
T1	460,4 a	708,6 a	1012 a	1543,7 a	2501,7 a
T2	477,2 a	810,1 a	1095,1 a	1571,4 a	1815,9 a
T3	410,9 a	687,7 a	895,3 a	1704,7 a	1832,7 a
.....Experimento 3.....					
T1	502 a	863,9 a	1170,1 a	2031,8 a	2453,7 a
T2	472,9 a	845,9 a	1095,7 a	2109,4 a	2572,3 a
T3	403,8 a	727,8 a	897,3 a	2062,8 a	2182,2 a

T1 – plantio direto sem compactação adicional; T2 – escarificado; T3 – compactação adicional. Médias na coluna, seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A compactação do solo interferiu no crescimento e desenvolvimento das plantas, afetando a emergência, estatura de plantas e área foliar, com reflexo direto na produtividade.

A produtividade do feijoeiro, no experimento 2, não foi significativamente diferente entre os tratamentos, mas percebe-se que o T3 apresenta a média mais baixa, sendo 29,4 % menor que a maior produtividade do T1 (Tabela 9). A

produtividade no T2 não apresentou diferença com relação ao T1, evidenciando que a escarificação foi eficiente na descompactação do solo compactado por duas passadas de máquina no ano anterior já que naquela ocasião apresentou redução na produtividade do feijoeiro em 40 %, quando comparado ao tratamento sem compactação adicional.

TABELA 9 - Produtividade da cultura do feijoeiro em três experimentos que diferem ao comparar tratamentos escarificado, plantio direto sobre 12 anos com o sistema com resíduo de compactação aplicada (1), compactação imediata aplicada sobre resíduo (2) e compactação imediata (3).

Tratamentos	Produtividade (kg ha ⁻¹)		
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
T1	1484,5 a	1535,2 a	1401,2 a
T2	1306,3 a	1502,3 a	1438,7 a
T3	566,5 b	1084,1 a	618,2 b

T1 – plantio direto sem compactação adicional; T2 – escarificado; T3 – compactação adicional. Médias na coluna, seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

No experimento 1 e 3, os tratamentos impuseram diferença significativa na produtividade do feijoeiro, onde o T3 apresentou menor média de produtividade e 61,8 % menor que T1 no experimento 1, e 57,03 % menor que o T2 no experimento 3.

O estado de compactação do T3, que apresentou densidade do solo maior que 1,8 g m⁻³ e macroporosidade menor que 0,1 m³ m⁻³, reduziu a produtividade do feijoeiro em aproximadamente 62%, 29% e 57%, respectivamente, para os experimentos 1, 2 e 3 baseados na melhor produtividade, onde o estado de compactação indica densidade do solo menor que 1,7 Mg m⁻³ e macroporosidade maior que 0,1 m³ m⁻³.

Pelos resultados, para alcançar maior produtividade, o manejo do solo deve atender os limites críticos impostos pelos atributos físicos do solo e suas interações no tempo. A cultura do feijoeiro no sistema plantio direto sem compactação adicional e no sistema de manejo que recebeu escarificação apresentou resultados semelhantes quanto aos indicadores de crescimento e produtividade e os efeitos da

compactação pregressa de 12 anos de plantio direto não foram observados quando comparado com manejo escarificado. A escarificação do solo pode reduzir a compactação em plantio direto (Inoue et al., 2002) mas os efeitos na produtividade e crescimento do feijoeiro não ficaram evidentes, discordando de Silva (2003) que, para Latossolo Escuro, afirma que a escarificação é uma prática que pode ser utilizada para diminuir a compactação em lavouras sob plantio direto e incrementa a produtividade de grãos de milho.

7.4. Conclusões

A densidade do solo restritiva à produção do feijoeiro foi superior a $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$.

Solos compactados com densidade maior que $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ e macroporosidade menor que $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ reduzem a altura da planta, a área foliar e a produtividade do feijoeiro, em torno de 50 %.

Os efeitos negativos da compactação adicional são preservados após doze meses e sucessão de três cultivos (soja, aveia e feijão) e reduzem a produtividade do feijoeiro em 61,8 %.

A escarificação do solo não promove o aumento da produtividade do feijoeiro e tampouco melhora seus parâmetros de crescimento, quando os indicadores de qualidade física do solo não são restritivos.

7.5. Literatura Citada

ALBUQUERQUE, J.A. **Variabilidade espacial de solo e planta em Podzólico Vermelho amarelo**. 1993. 100f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1993.

BARLEY, K.P. Influence of soil strength on growth of roots. **Soil Science**, v.96, p.175-180, 1963.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p (DNPEA. Boletim Técnico, 30).

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS – Núcleo Regional Sul/EMBRAPA-CNPT, 1995. 233p.

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

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 1979.

HADAS, A. Soil tilth - the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. **Soil & Tillage Research**, v.43, p.7-40, 1997.

HARTMANN, H. T.; KESTER, D. F. Principios de la propagación por semillas. In: **Propagación de Plantas**. México continental, 1971. p.141-176.

HELMS, T.C., DECKARD, E.L., GOOS, R.J. et al. Soybean seeding emergence influenced by days of soil water stress and soil temperature. **Agronomy Journal**, v.88, p.657-661, 1996.

INOUE, T.T.; ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; ESTEVES, N.; MIGNOSO, V.; LEITE, J.C. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférico após 13 anos de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., Cuiabá, 2002. **Resumos Expandidos**. Cuiabá: SBCS, 2002. (CD-ROM)

NEGI, S.C.; MCKYES, E.; TAYLOR, F.; DOUGLAS, E.; RAGHAVAN, G.S.V. Crop performance as affected by traffic and tillage in a clay soil. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.23, p.1364-1368, 1980.

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.197-200, 1968.

POPINIGIS, F. **Fisiologia das sementes**, Brasília, 5. ed., 1985. 289p.

STATICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS. SAS/STAT **Procedure guide for personal computers**. Version 5, SAS Inst. Cary, 1998.

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

STRECK, C.A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**, v.96, p.153-156, 1963.

van GENUCHTEN, M. T. A. Closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

8. CAPÍTULO 4

RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DO SOLO E A DINÂMICA DA ÁGUA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE MANEJO E ESTADOS DE COMPACTAÇÃO DE UM ARGISSOLO SOB FEIJOEIRO

8.1. Introdução

As culturas agrícolas, em sua maioria, são fortemente dependentes da irregularidade da distribuição das chuvas e da capacidade de armazenamento dessa água pelos solos que as suportam, limitando seu crescimento e desenvolvimento, acarretando prejuízos irreparáveis na produção agrícola e, por consequência, na economia interna do país.

A disponibilidade de água no solo, determinante dos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas comercialmente, depende da adequada distribuição das precipitações ao longo de seu ciclo e de solos com propriedades e características que permitam o armazenamento e a disponibilidade dessa água durante todo o período de cultivo. Essa capacidade do solo em promover ao sistema radicular condição adequada para o crescimento e desenvolvimento da planta é considerada uma qualidade física do solo. A estrutura do solo pode ser alterada pelas práticas de manejo, influenciando a produtividade das culturas por meio das alterações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes (Tormena et al., 1998).

No Rio Grande do Sul, os déficits de água em parte do ciclo das culturas de verão são freqüentes e vem trazendo enormes prejuízos e transtornos aos agricultores. Uma das estratégias de amplitude recente é o escalonamento da semeadura dentro da época recomendada para cada cultura, mas mesmo assim, em anos onde se prolongam os períodos de estiagem, verificam-se acentuadas quedas na produção de grãos e pastagens. Com a franca expansão do sistema plantio direto, com área plantada superior a 21 milhões de hectares no Brasil no ano de 2004, segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (www.febrapdp.org.br), surgiram vários questionamentos relacionados à dinâmica da

água no solo, principalmente se o maior armazenamento de água proporcionado por esse sistema se traduz em maior disponibilidade para as plantas.

Nos sistemas de produção agrícola em que se adota o plantio direto, o solo é minimamente revolvido e o aporte de resíduos na superfície induz aumento da matéria orgânica que, juntamente com raízes em decomposição, proporciona a recuperação da estrutura do solo e uma maior distribuição e continuidade dos poros. Os resíduos que permanecem na superfície do solo dissipam a energia cinética das gotas da chuva e proporcionam maior percurso ao escoamento da água de superfície. Com isso, pode aumentar a infiltração da água no solo e, conseqüentemente, o armazenamento. No entanto, a ausência de revolvimento do solo associada a maior intensidade de uso da terra, expondo o solo a intenso tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade do solo, tem contribuído para alterar a qualidade estrutural do solo, trazendo com isso um aumento do estado de compactação em muitas áreas manejadas nesse sistema.

A compactação do solo afeta a distribuição das proporções das frações sólidas, líquidas e gasosas no solo e, em conseqüência, pode alterar a dinâmica da água no solo. O conteúdo de água no solo interfere na aeração, na temperatura e na resistência do solo à penetração de raízes, que também são afetadas indiretamente pela densidade do solo e pela distribuição do tamanho de poros. O aumento no conteúdo de água no solo induz o decréscimo da aeração e da resistência do solo. O primeiro efeito é indesejável quando abaixo de 10 %, valor considerado limitante ao processo de respiração radicular e as trocas gasosas do solo (Grable & Siemer, 1968), e o segundo efeito é desejável por ser facilitador do processo de penetração das raízes no solo.

Dessa forma, esses fatores físicos podem interagir e, para cada condição estrutural do solo, existe uma faixa ótima de água para o crescimento vegetal (Letey, 1985). Devido a essas interações, Silva et al. (1994) propuseram um índice para avaliar a qualidade estrutural do solo denominada Intervalo hídrico ótimo (IHO). Esse índice considera a faixa de conteúdo de água no solo como sendo aquela onde as limitações ao crescimento vegetal, associadas à umidade do solo, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes são minimizadas.

Em sistemas agrícolas irrigados, o conhecimento da faixa de conteúdo de água no solo (IHO) possibilita interferir sobre os atributos do solo, partindo da observação dos momentos ou situações que as plantas experimentam durante o

ciclo de desenvolvimento, de tal forma que o sistema água-planta-solo seja manejado por estratégias que possibilitem otimizar e adequar os procedimentos às condições do solo. Por outro lado, em sistemas de produção não irrigados, o IHO serve como um elemento norteador ao manejo do solo e culturas, procurando-se adotar práticas que venham a aumentar o intervalo de água disponível as plantas, controlando os parâmetros que interferem direta ou indiretamente nesse processo, tais como a densidade do solo e o espaço poroso.

Neste trabalho, através do estudo das relações entre algumas propriedades físicas do solo associadas à dinâmica da água em diferentes condições de manejo e estados de compactação do solo, obteve-se o IHO e associou-se ao crescimento e produtividade da cultura do feijoeiro em Argissolo da Depressão Central do RS.

8.3. Material e Métodos

Foram realizados dois experimentos, instalados na área experimental do departamento de solos da Universidade Federal de Santa Maria, na região fisiográfica da depressão central do Rio Grande do Sul, localizada a 29° 41' latitude sul, longitude 53° 48' W Gr W e altitude de 95 m. O clima da região, segundo a classificação de Köepen, é subtropical úmido, tipo "Cfa". As médias anuais de temperatura, precipitação e umidade relativa são de 19,3° C, 1561 mm e 82%, respectivamente.

O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (EMBRAPA, 1999), com textura superficial franco arenosa, pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL,1973). As características granulométricas do solo estão apresentadas na tabela 10. Na determinação da granulometria, seguiu-se a metodologia descrita em EMBRAPA (1979).

TABELA 10 - Características granulométricas do Argissolo da área experimental. Santa Maria, RS. 2003.

Camada do solocm.....	Argila	Silte	Areia grossa	Areia fina
g kg ⁻¹			
0 – 10	81	292	250	378
10 – 20	85	298	219	398
20 - 30	102	301	202	395

A área utilizada para o experimento vinha sendo cultivada há doze anos no sistema de semeadura direta com a rotação cultural incluindo aveia preta, soja e milho. No momento da aplicação dos tratamentos a área se encontrava cultivada com aveia preta que foi dessecada antes da semeadura da cultura.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com quatro repetições. Em parcelas de 6 x 7 m foram aplicados os tratamentos que se constituíram de três manejos do solo, induzindo diferentes estados de compactação. Os tratamentos foram os seguintes: PD - Plantio direto sem compactação adicional; Esc – Escarificação; e PDc - Plantio direto sobre compactação adicional de quatro passadas de máquina de 9 Mg.

O tratamento PD reflete o histórico das tensões sofridas pelo solo em anos anteriores, principalmente pelas operações de semeadura e colheita. O tratamento Esc procurou reduzir a compactação existente por pressões de anos anteriores através de mobilização de solo até a camada de 20 cm e, o tratamento PDcompac retrata maiores estados de compactação.

O PDc difere no experimento 1 daquele do experimento 2. No experimento 1, a compactação adicional de 9 Mg foi produzida em parcelas com resíduo de compactação causada pelo tráfego de máquina de 10 Mg no ano anterior, e no experimento 2 a compactação foi produzida em parcelas manejadas por plantio direto há doze anos. As parcelas escarificadas no experimento 2 tinham sido compactadas no ano anterior.

A máquina utilizada para produzir no solo os efeitos da compactação foi uma pá-carregadeira, marca CLARCK - MICHIGAN 75III, com peso próprio de 7,736 Mg mais a concha repleta com pedra britada nº 1, para dessa forma aumentar a massa no eixo frontal do equipamento e garantir a distribuição uniforme da massa total de

9,046 Mg. Os pneus eram PIRELLI, *PN 14 G2/L2, 13.00-24 10PR*, com 33 cm de largura e 105 cm de diâmetro, radiais com garradeiras desgastadas pelo uso evitando o cisalhamento superficial. O tráfego foi realizado por toda parcela de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si e as passadas foram sobrepostas as anteriores de forma que toda área ficasse igualmente trafegada.

A escarificação foi realizada por um escarificador mecânico de quatro hastes até a profundidade de 20 cm.

Para a determinação da densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, seguindo metodologia descrita em Oliveira (1968), foram coletadas amostras com estrutura preservada em cilindros metálicos com 5,36 cm de diâmetro e 3 cm de altura, em sete camadas, a saber: 0 a 5; 5 a 10; 10 a 15; 15 a 20; 20 a 30 e 30 a 40 cm.

O procedimento para a obtenção da curva de retenção de água no solo nos pontos de baixa tensão foi a partir da associação dos dados obtidos em mesa de tensão e em aparelho de placas porosas de Richards, utilizando as mesmas amostras usadas para determinar a densidade do solo. Essas amostras foram saturadas e submetidas a tensões de 6 kPa, 10 kPa, 33 kPa, 100 kPa e 500 kPa. Para obter o potencial da água no solo nas tensões até 3000 kPa, empregou-se amostra deformada, das mesmas camadas, a quais foram levadas à câmara de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 da Decagon (“dewpoint potentiometer”), que geraram curvas de retenção conforme metodologia descrita em Decagon (2002). Esses dados de umidade foram em base de massa, umidade gravimétrica, os quais foram multiplicados pela densidade do solo, calculada a partir das amostras com estrutura preservada, das respectivas camadas, para então obter a umidade volumétrica e, assim, reunir em uma mesma curva os pontos de umidade (θ) x tensão (Ψ), da mesa de tensão, do aparelho de Richards e do potenciômetro.

Para ajuste das curvas de retenção de água, empregou-se o modelo sugerido por van Genuchten (1980), mediante programa computacional SWRC software (Dourado Neto et al., 2001), conforme equação 1.

$$\theta = \frac{\theta_r + (\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha \Psi)^n)^m} \quad (1)$$

onde:

θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_r = umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s = umidade de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

ψ = potencial matricial (kPa);

α , n , e m = parâmetros de ajuste do modelo.

A resistência do solo à penetração foi determinada com um penetrômetro de taxa constante de penetração, com armazenamento eletrônico de dados (Collares et al., 2004) dotado de ponta cônica com ângulo de penetração de 30° e 12,83 mm de diâmetro da base. As leituras foram realizadas a cada 0,15 cm de profundidade. Em duas situações as medidas foram realizadas empregando um penetrômetro digital portátil, com armazenador de dados, marca Remik CP 20, Ultrasonic Cone Penetrometer, com haste e ponta cônica iguais ao anterior. Em todas as situações, a resistência à penetração foi determinada, até a profundidade de 55 cm, em diferentes estádios de desenvolvimento das plantas e em diferentes condições de umidade.

Simultaneamente à determinação da resistência à penetração, fez-se a determinação da umidade do solo, com o uso de um TDR (Time Domain Reflectometry) TRASE da Soil Moisture. Os sensores do TDR tiveram sua base confeccionada em fibra (tecnil), suporte de duas hastes metálicas construídas em aço inox com 23 cm de comprimento, conectadas entre si e ao aparelho por meio de cabo coaxial de 58 ohms. As hastes foram inseridas no solo na direção da linha de semeadura, com inclinação tal que integrasse uma área de acordo com as camadas de 0 a 6; 6 a 12; 12 a 24 e 24 a 48 cm de profundidade, onde se desenvolve o sistema radicular das plantas.

O TDR foi calibrado para o Argissolo, ajustando-se uma função, conforme sugerido por Topp et al. (1980), com a qual se obtém a umidade volumétrica (θ). A equação a seguir expressa o ajuste:

$$\theta = -0,1378 + 0,0781 * ka - 0,0063 * ka^2 + 0,0002 * ka^3 \quad (2)$$

onde :

$ka = (t * c / L)^2$ θ é a umidade volumétrica do solo em $m^3 m^{-3}$;

ka = constante dielétrica aparente do solo;

t = tempo de propagação da onda eletromagnética na haste metálica, em nanosegundos;

c = velocidade de propagação da onda ($30 * 10^9$ cm s^{-1}) e,

L = comprimento da haste metálica em cm.

Para estimar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram coletadas amostras com estrutura preservada, com amostrador de solo tipo Uhland, em cilindros metálicos com volume de 331,34 cm^3 , na camada de 0 a 20 cm de profundidade, em diferentes condições de umidade e densidade. A amplitude de variação da densidade foi atingida pela estratégia na coleta das amostras, as quais totalizaram 206 anéis, extraídos dos mais variados locais dentro e a margem das parcelas experimentais, pontos do terreno que estavam sob influência dos tratamentos aplicados. A variação da umidade foi obtida através da variação temporal na amostragem dos anéis, coletando amostras com amplitude de umidade nas condições de campo. Em todas as amostragens, os cilindros metálicos foram armazenados individualmente e colocados em caixas herméticas para o transporte até o laboratório. No laboratório, após preparo de rotina, foram imediatamente submetidas à penetração, empregando o penetrômetro citado por Collares et al. (2004), para obtenção da resistência do solo à penetração, na umidade em que se encontravam.

Após a determinação da resistência à penetração (RP), as amostras foram pesadas e posteriormente colocadas em estufa a 105°C por 24 horas, para a determinação da umidade gravimétrica (U_g) e densidade do solo. Com essas avaliações ajustou-se a resistência a penetração (RP) em relação a umidade volumétrica (θ) e densidade do solo (D_s), utilizando-se o modelo não-linear proposto por Busscher (1990), expresso na equação 3, empregando o software estatístico SAS (1998).

$$RP = a * \theta^b * D_s^c \quad (3)$$

onde os coeficientes a , b e c são parâmetros do ajuste.

O IHO foi determinado conforme metodologia proposta por Silva et al. (1994). O limite inferior do IHO considerado foi o conteúdo de água no solo onde a resistência á penetração atingisse 2 MPa (θ_{RP}) ou a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}).

O ponto de murcha permanente fisiológico foi obtido em dois experimentos nos anos de 2002 e 2003. Para tanto, foram extraídas amostras de solo de vários pontos dentro das parcelas experimentais, na camada de 0 a 20 cm. O solo depois de destorroado e homogeneizado, foi colocado em vasos com volume de 921,6 ml, num total de 25 repetições para três espécies vegetais, a saber: feijão, soja e girassol. O solo, de todos os vasos, foi criteriosamente umedecido para que quatro sementes colocadas em cada vaso encontrassem condições ideais de germinação e desenvolvimento inicial, até atingir 4 folhas definitivas, momento em que foi realizado um desbaste para que uma única planta permanecesse em cada vaso. A superfície do solo foi impermeabilizada através de uma camada de parafina, deixando apenas uma planta livre para que as trocas de água com o meio externo ocorressem somente através da transpiração. Durante a noite, na murcha das folhas, os vasos foram levados à câmara úmida para recuperar a turgidez das folhas, repetindo a operação até que ocorresse a murcha permanente, verificada quando as plantas foram colocadas em câmara úmida com 100% de saturação atmosférica e a turgescência das folhas não foi mais recuperada. Nesse momento, mediu-se a umidade gravimétrica do solo contido nos vasos. Considerando experimentos de dois anos seguidos, a média dos dados para a umidade gravimétrica, na camada de 0-20 cm do Argissolo, foi de $0,051 \text{ kg kg}^{-1}$, valor correspondente a ponto de murcha fisiológico para esse solo.

O limite superior do IHO considerado foi a umidade do solo quando a porosidade de aeração é de 10 % ($\theta_{Ar10\%}$) ou na umidade do solo na capacidade de campo.

A capacidade de campo foi obtida através de um experimento realizado nas parcelas experimentais dos dois experimentos, onde a umidade do solo foi monitorada através da metodologia da Reflectância de Domínio do Tempo (TDR), o qual estava conectado por cabo coaxial de 58 ohms a 4 sensores de duas hastes metálicas, instaladas até a profundidade de 48 cm. Através de um datalogger os dados foram armazenados e, com auxílio de multiplexadores, obtiveram-se medidas simultâneas de 48 sensores, ou seja de 12 distintas parcelas. Os locais, onde

estavam instalados os sensores, foram inundados com o auxílio de um anteparo físico de forma circular, construído em PVC rígido, disposto no entorno de cada ponto de observação, com a base enterrada 20 cm no solo para impedir os movimentos laterais de água, permitindo colocar uma lâmina de 300 mm de água por parcela que, infiltrando na vertical, saturou o solo até aproximadamente 60 cm de profundidade. No momento em que a lâmina de água infiltrou totalmente, considerado como tempo zero, as coletas de dados de umidade foram inicializadas. As determinações foram simultâneas, a cada 5 min, e realizadas até 96 horas do tempo zero. Os dados armazenados foram transferidos a um computador para então serem processados. Considerou-se que o valor de umidade que corresponderia à capacidade de campo, medida no campo, seria o valor ajustado a em uma curva descendente de umidade com o tempo em que abruptamente fosse interrompida, quando a drenagem natural estava cessada e, portanto, a umidade se aproximaria de uma constante.

Os dados foram ajustados através do software estatístico SAS (1998) e a equação $\theta = 0,1387 + 0,0492 D_s$ expressa a relação entre a umidade ajustada e a densidade do solo, empregada como limite superior θ_{CC} , na definição do IHO. Para cada valor de D_s , o IHO foi determinado pela diferença entre o limite superior e o limite inferior considerados.

Pela metodologia proposta por Silva et al., (1994), estimou-se a faixa de umidade do solo onde as condições físicas não seriam limitantes ao desenvolvimento das plantas (IHO), situada entre o limite inferior (resistência à penetração do solo ou ponto de murcha permanente) e o limite superior (capacidade de campo a campo ou umidade do solo quando a aeração é de 10%)

A semeadura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.; cv.: FT Bio nobre), foi realizada no dia 15 de dezembro de 2002, empregando densidade de semeadura de 250 mil plantas ha^{-1} em um espaçamento de 45 cm entre linhas. A adubação de base seguiu a recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo - RS/SC (1995). Os demais tratamentos culturais constituíram-se na aplicação de herbicida pós-emergente para o controle das plantas daninhas, aplicação preventiva de fungicida contra a antracnose do feijoeiro e uma capina manual para o controle das plantas daninhas no final do ciclo.

Durante o ciclo da cultura, foram aplicadas irrigações controladas, com objetivo de proporcionar o desenvolvimento das plantas atingindo todas as fases de

seu ciclo. Essas irrigações não foram regulares, para que a cultura experimentasse grandes variações na umidade do solo e, assim, se pudesse avaliar, simultaneamente, a variação na resistência mecânica à penetração ao longo de todo ciclo da cultura.

Quando a cultura se encontrava em plena floração, fez-se a avaliação do desenvolvimento e da distribuição do sistema radicular nos diferentes tratamentos, empregando o método do perfil cultural descrito por Böhm (1979). O perfil foi feito perpendicularmente à linha de semeadura, com a parede vertical do perfil distante de 3 cm da planta. Foram utilizadas varetas de metal para retirar uma camada de aproximadamente 1,5 cm do perfil, expondo cuidadosamente as raízes. Após a exposição das mesmas, foi utilizado um retângulo de 50 x 30 cm subdividido com fio de náilon formando uma malha de 5 x 5 cm para desenhar e fotografar a distribuição radicular no perfil.

Na maturação fisiológica, avaliou-se a produtividade, colhendo-se uma área útil de 3 x 2 m na parte central das unidades experimentais e corrigindo-se a umidade dos grãos para 13%.

8.3. Resultados e Discussões

8.3.1. Densidade e porosidade do solo

No experimento 1, a densidade do solo da camada de 0 a 5 cm, foi menor no PD, com valor de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 11), abaixo do valor crítico de $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para Argissolo com teor de argila de 12 %, sugerido por Reichert et al., (2003), embora nesse tratamento, dos 5 até os 40 cm de profundidade, fosse sempre superior a $1,66 \text{ Mg m}^{-3}$, que é a densidade da última camada, e sempre inferior aos limites críticos. A escarificação, quando comparada ao plantio direto por 12 anos sucessivos, não reduziu a densidade do solo na camada de 0-20 cm de profundidade, mas foi menor e significativamente diferente do tratamento com compactação adicional, refletindo na macroporosidade que foi maior do que $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ até os 10 cm de profundidade. A macroporosidade na camada de 0-5 cm, em todos os tratamentos, foi superior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, possivelmente pelos efeitos dos mecanismos sulcadores da semeadora que promove revolvimento superficial e

localizado na linha de semeadura, pode ter influenciado positivamente nesse atributo, conferindo uma melhor aeração do solo.

TABELA 11 - Densidades e porosidades do solo, no Experimento 1, submetido a diferentes manejos e níveis de tráfego e cultivado com a cultura do feijoeiro.

Tratamento	Camada (cm)							
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
Densidade (m^3m^{-3})								
PD	1,38 a	1,76ab	1,71 b	1,76 b	1,68 a	1,71 a	1,70 a	1,66 a
Esc	1,54 a	1,60 b	1,81ab	1,73 b	1,80 a	1,74 a	1,70 a	1,72 a
PDc	1,58 a	1,87 a	1,90 a	1,89 a	1,82 a	1,82 a	1,76 a	1,66 a
Porosidade Total (m^3m^{-3})								
PD	0,48 a	0,34ab	0,36 a	0,34 a	0,35 a	0,35 a	0,36 a	0,39 a
Esc	0,39 a	0,39 a	0,34 a	0,34 a	0,32 b	0,34 a	0,35 a	0,30 a
PDc	0,43 a	0,31 b	0,33 a	0,33 a	0,33ab	0,33 a	0,32 a	0,39 a
Microporosidade (m^3m^{-3})								
PD	0,28 a	0,26 a	0,28 a	0,26ab	0,25 a	0,27 a	0,26 a	0,26 a
Esc	0,27 a	0,27 a	0,27 a	0,26 b	0,27 a	0,26 a	0,26 a	0,20 a
PDc	0,32 a	0,25 a	0,26 a	0,27 a	0,27 a	0,27 a	0,26 a	0,30 a
Macroporosidade (m^3m^{-3})								
PD	0,20 a	0,09ab	0,08 a	0,08 a	0,09 a	0,09 a	0,10 a	0,13 a
Esc	0,20 a	0,13 a	0,06 a	0,08 a	0,05 a	0,08ab	0,10 a	0,11 a
PDc	0,11 a	0,05 b	0,07 a	0,06 b	0,07 a	0,06 b	0,05 a	0,09 b

PD - semeadura direta sem compactação adicional; Esc - escarificado; PDcompac- Semeadura direta com compactação adicional por quatro passadas de máquina sobre compactação residual do ano anterior. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

Na camada de 5 a 40 cm, a densidade do solo do tratamento PD, foi sempre maior que os valores críticos de densidade que caracteriza solo compactado restritivos ao crescimento de plantas $1,65 Mg m^{-3}$, estabelecido por Reinert et al. (2001).

A escarificação diminuiu a densidade do solo até 10 cm, aumentando o volume de poros maiores e, na camada de 5 a 10 cm, foi de $0,13 m^3 m^{-3}$, co relação

ao PD. No tratamento Esc, a densidade do solo foi de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada até 10cm, menor que no PDc. Na camada de 10 a 15 cm, observou-se a maior densidade, de $1,81 \text{ Mg m}^{-3}$, caracterizando uma zona compactada que os mecanismos do escarificador não foram capazes de romper, possivelmente ocasionado pelo continuado tráfego de máquinas em operações agrícolas comuns ao plantio direto que provoca confinamento de pressões na camada de 8 a 15 cm (Reinert et al., 2001). No PDc a maior densidade foi observada na camada de 10 a 15 cm, igual a $1,90 \text{ Mg m}^{-3}$, ratificando as observações anteriores e indicando o confinamento das pressões nessa camada causadas pela compactação imediata e o residual do do ano anterior.

O efeito do tráfego refletiu-se na densidade do solo no experimento 2, (Tabela 12). A densidade foi maior em todas as camadas para o tratamento com compactação adicional (PDc), exceto na camada de 20 a 25 cm no qual foi menor. A escarificação diminuiu a densidade do solo até os 15 cm de profundidade, no entanto, diferiu estatisticamente dos demais tratamentos apenas na camada de 15 a 20 cm, onde as cargas oriundas de pressões exercidas pelo tráfego de máquinas agrícolas se acumulam. No tratamento com plantio direto sem compactação adicional (PD), a densidade não diferiu estatisticamente, apesar de ser mais baixa do que o tratamento com compactação adicional (PDc), e isso se deve, possivelmente ao estado de compactação presente nessa área, resultante do acúmulo de pressões nos 12 anos de plantio direto. Na camada de 10 a 15 cm, para o PD e PDc, observou-se as maiores densidades de $1,78$ e $1,84 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente. Os valores máximos observados nessa camada se assemelham às observações do experimento 1.

Os menores valores de densidade ocorreram nos primeiros 5 cm de profundidade para todos os tratamentos. A compactação adicional imposta pelo tráfego (PDc) elevou a densidade do solo nas camadas de 5 a 30 cm, para valores superiores ao considerado crítico, observando a estratégia proposta pelo indicador de qualidade física do solo IHO quando se iguala a zero. O plantio direto sem compactação adicional (PD) apresentou valores de densidade próximos do crítico na camada dos 5 aos 15 cm.

TABELA 12 - Densidades, porosidades do solo, no Experimento 2, submetido a diferentes manejos níveis de tráfego e cultivado com a cultura do feijoeiro.

Tratamento	Camada (cm)							
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
Densidade (m³m⁻³)								
PD	1,43 a	1,77ab	1,78 b	1,74a	1,73 a	1,67 a	1,64 a	1,62a
Esc	1,44 a	1,55 b	1,67 ab	1,72b	1,71 a	1,69 a	1,69 a	1,60a
PDc	1,54 a	1,78 a	1,84 a	1,83a	1,79 a	1,80 a	1,78 a	1,68 a
Porosidade Total (m³m⁻³)								
PD	0,49a	0,37 ^a	0,34a	0,35a	0,36a	0,37a	0,37a	0,40a
Esc	0,47a	0,42 ^a	0,37a	0,36a	0,36a	0,36ab	0,35a	0,38a
PDc	0,46a	0,37 ^a	0,33a	0,32a	0,34a	0,34b	0,37a	0,37a
Microporosidade (m³m⁻³)								
PD	0,32a	0,26 ^a	0,26a	0,25a	0,26a	0,26a	0,25a	0,25a
Esc	0,27b	0,25 ^a	0,25a	0,24a	0,25a	0,24a	0,24a	0,24a
PDc	0,32a	0,25 ^a	0,24a	0,24b	0,25a	0,25a	0,26a	0,24a
Macroporosidade (m³m⁻³)								
PD	0,17a	0,11ab	0,08a	0,10a	0,10a	0,12a	0,12a	0,15a
Esc	0,20a	0,17 ^a	0,12a	0,11a	0,11a	0,11a	0,11a	0,15a
PDc	0,14a	0,08b	0,08a	0,08b	0,08a	0,09a	0,11a	0,12b

PD- Semeadura direta sem compactação adicional; Esc- Escarificado; PDc- Semeadura direta com compactação adicional por quatro passadas de máquina sobre 12 anos de plantio direto. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste DMS a 5%.

Os valores de porosidade não apresentaram muitas diferenças estatísticas (Tabela 12), mas pode se observar que, no tratamento com compactação adicional (PDc), a porosidade total foi menor na maioria das camadas e isso se deve-se à diminuição dos macroporos verificada nesse tratamento. A maior porosidade total foi observada no tratamento com escarificação (Esc), onde a macroporosidade foi superior, principalmente nas camadas superficiais. Nos tratamentos em que a densidade do solo foi maior, a macroporosidade foi a classe de poros que foi mais afetada, apresentando valores inferiores aos críticos nas camadas mais compactadas, predominantemente no PDc.

Os resultados de densidade e porosidade permitem inferir sobre o estado de compactação do solo. Esses atributos do solo apontam para estratégias de manejo da agricultura que minimizam os efeitos negativos da compactação. Nos dois experimentos, os comportamentos dessas propriedades foram semelhantes.

8.3.2. Intervalo hídrico ótimo (IHO) e densidade do solo

O IHO tem sido utilizado como indicador de qualidade física do solo, pois integra determinações de resistência do solo à penetração de raízes, densidade, porosidade e umidade do solo. Os sistemas de manejo do solo podem alterar a densidade do solo, interferindo nos demais parâmetros físicos que compõe o IHO.

A umidade do solo nos limites críticos do IHO encontra-se na figura 9 e a relação entre a resistência do solo à penetração (RP), a densidade do solo (Ds) e a umidade volumétrica (θ), esta expressa na equação 4, conforme modelo proposto por Busscher (1990).

$$RP = 24,9929 \times \theta^{-1,0896} \times Ds^{4,9261} \quad (4)$$

onde :

RP = resistência do solo à penetração,

θ = umidade volumétrica,

Ds = densidade do solo,

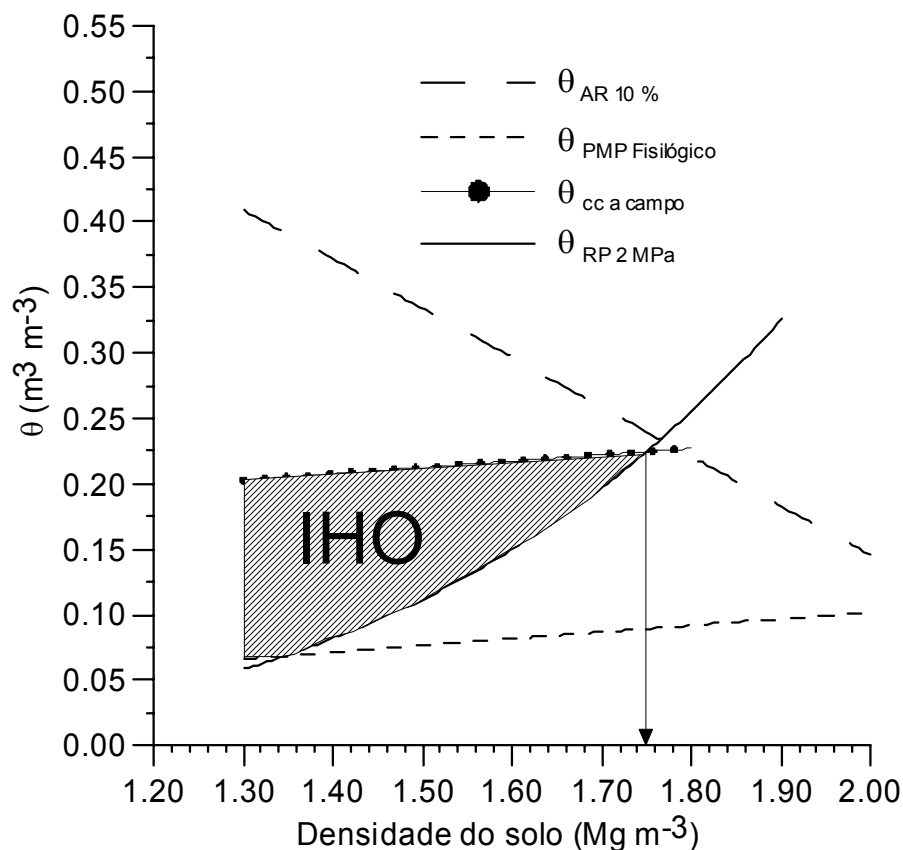


FIGURA 9 - Variação do conteúdo de água no solo com a densidade nos níveis críticos da porosidade de aeração ($\theta_{AR10\%}$), capacidade de campo (θ_{cc}), resistência do solo à penetração (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

Na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ocorre um aumento da retenção de água com o aumento da densidade, pois com valores mais elevados de densidade ocorre uma redistribuição dos tamanhos de poros, resultando em redução na macroporosidade e um aumento na microporosidade do solo. O contrário é observado na porosidade de aeração ($\theta_{AR10\%}$), onde ocorre uma redução progressiva com o aumento da densidade do solo.

A resistência do solo à penetração aumentou progressivamente com o aumento da densidade do solo e foi considerado o limite inferior do IHO. O limite superior do IHO foi à capacidade de campo. O IHO sofre uma redução progressiva com o aumento da densidade, até ser nulo na densidade de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$.

A relação funcional entre o IHO e a densidade do solo é apresentada na figura 10. Pode-se observar que o IHO é negativamente relacionado com a densidade do solo, atingindo valores críticos, e próximos a zero, quando a densidade do solo se aproxima de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, implicando em altos riscos para a produtividade dos cultivos agrícolas exigentes em aeração do solo e suscetíveis a resistência do solo à penetração.

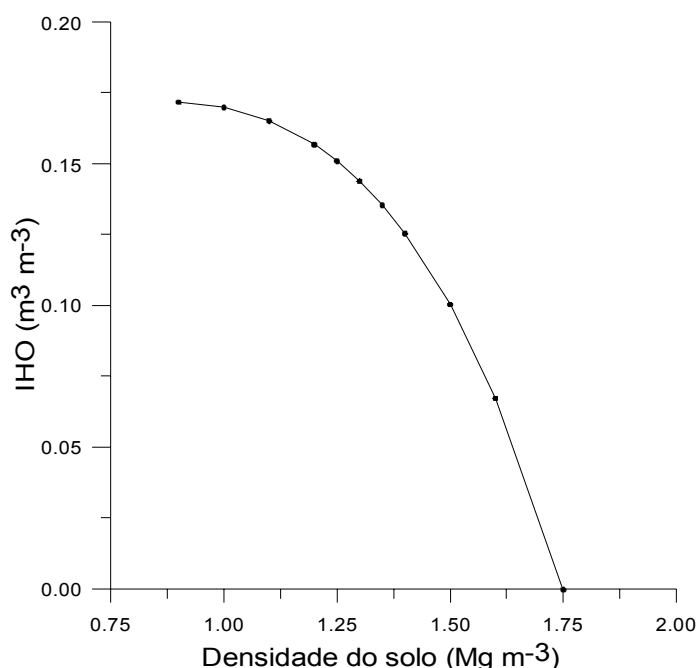


FIGURA 10 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo.

A diferença entre o limite superior e o limite inferior do IHO, no experimento 1, foi de $0,13 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para o PD, de $0,088 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para o tratamento Esc e $0,075 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para o PDc. Esses dados permitem dizer que os tratamentos PDc e Esc impuseram restrições às plantas, quer seja pelos efeitos da compactação adicional ou pela ineficácia da escarificação na promoção de melhor aeração do solo tal que qualificasse esse ambiente às plantas.

No experimento 2, para o tratamento PD, o IHO variou de $0,12 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ na menor densidade até zero para a maior densidade. No tratamento Esc os valores do IHO variaram de $0,11 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ até zero. No plantio direto com compactação adicional (PDc), o IHO variou de $0,088 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ na menor densidade até zero para as densidades superiores a $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, indicando que as maiores restrições devido à

aeração e resistência do solo estão associadas a esse tratamento. Como nos três tratamentos a densidade atingiu valores superiores a $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, e nesse valor o IHO é nulo, a densidade do solo passou a ser limitante ao desenvolvimento e crescimento do feijoeiro, restringindo de alguma forma o acesso à água.

8.3.3. Umidade do solo e resistência do solo à penetração durante o ciclo da cultura

Ao longo do ciclo da cultura houve uma grande flutuação no teor de água no solo, devido principalmente aos ciclos de umedecimento e secagem, consequência das precipitações e dos períodos de estiagem observados no período. As menores umidades ocorreram nas camadas superficiais do solo, no início do período de monitoramento, porém no final do ciclo da cultura ocorreram na camada de 24 a 48 cm (Figuras 11 e 12).

A umidade do solo entre o limite superior e o limite inferior do IHO, graficados paralelamente ao eixo da abscissa (Figuras 11 e 12), determina a faixa de umidade onde a condição física do solo seria ideal para o desenvolvimento de plantas, sem ter restrições severas ao crescimento de plantas.

Considerando que a θ_{CC} e $\theta_{AER10\%}$ sejam os limites superior e θ_{RP} e θ_{PMP} os limites inferiores, estabeleceu-se para cada tratamento a umidade limitante, que está graficada paralelamente ao eixo da abscissa. Dessa forma, foi possível observar para cada tratamento e em cada camada as restrições de umidade experimentadas pelas plantas durante o ciclo do feijoeiro. Essa estratégia permite observar o número de dias que o tratamento impôs restrições às plantas, avaliadas pela metodologia do IHO.

No experimento 1, o tratamento PD permitiu que a umidade permanecesse dentro dos limites do IHO, entre $0,14$ e $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, em praticamente todo o tempo (Figura 11a), excetuando medidas isoladas e pontuais que não afetaram, por essa análise, a cultura do feijoeiro.

Os tratamentos Esc e PDc, com faixas de umidade mais estreitas durante o ciclo da cultura, de $0,19$ a $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,21$ e $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, permaneceram por longo período com umidade fora dos limites estabelecidos (Figura 11b e 11c). O Esc ficou por 20 dias em condição de umidade restritiva, dos

44 DAS até 64 DAS, período crítico, coincidindo com fase reprodutiva da cultura. No PDc, o tempo de restrição foi de 23 dias os quais as plantas experimentaram limitações. A umidade foi menor nas camadas superficiais, e para as camadas de 12 a 24 cm e 24 a 48 cm mantiveram-se dentro ou muito próximo da faixa limite. Como a compactação no sistema de plantio direto imprime maior densidade na camada de 10 a 15 cm, se a umidade nessa camada for maior possibilitará condição menos limitante ao crescimento radicular, buscando água e nutrientes em camadas mais profundas.

O experimento 2 revela que houve períodos em que a umidade do solo esteve abaixo do limite inferior para algumas camadas. A situação mais crítica ocorreu no PD que recebeu compactação adicional (PDc) (Figura 12c), onde por um período de 22 dias a umidade do solo, em todas as camadas avaliadas, esteve abaixo do limite inferior do IHO, confirmando possíveis maiores restrições nesse tratamento. Esse período ocorreu durante fases importantes do ciclo de crescimento e reprodutivo das plantas.

Pela variação de umidade observada nos dois experimentos, pode-se afirmar que a escarificação no experimento 1 foi menos eficiente, considerando que a faixa limitante foi mais estreita, situada entre 0,19 e 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, enquanto que a escarificação no experimento 2 foi eficaz, mantendo uma faixa mais ampliada, entre 0,14 e 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, próxima àquela do PD, mesmo que no ano anterior essas parcelas tenham sido compactadas por aplicação adicional de cargas além daquelas comuns ao longo período de utilização do plantio direto.

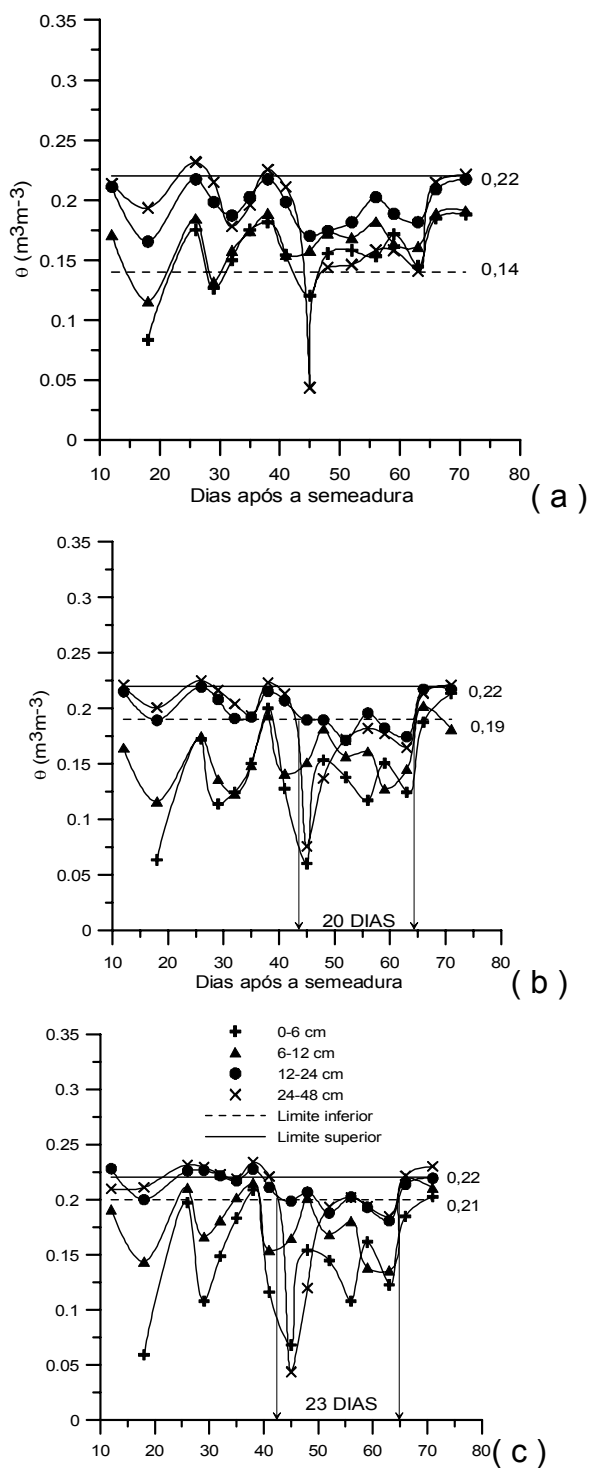


FIGURA 11 - Umidade volumétrica do solo ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), limite superior e inferior do IHO para os tratamentos PD (a), Esc (b) e PDC(c), no experimento 1, ao longo do ciclo do feijoeiro.

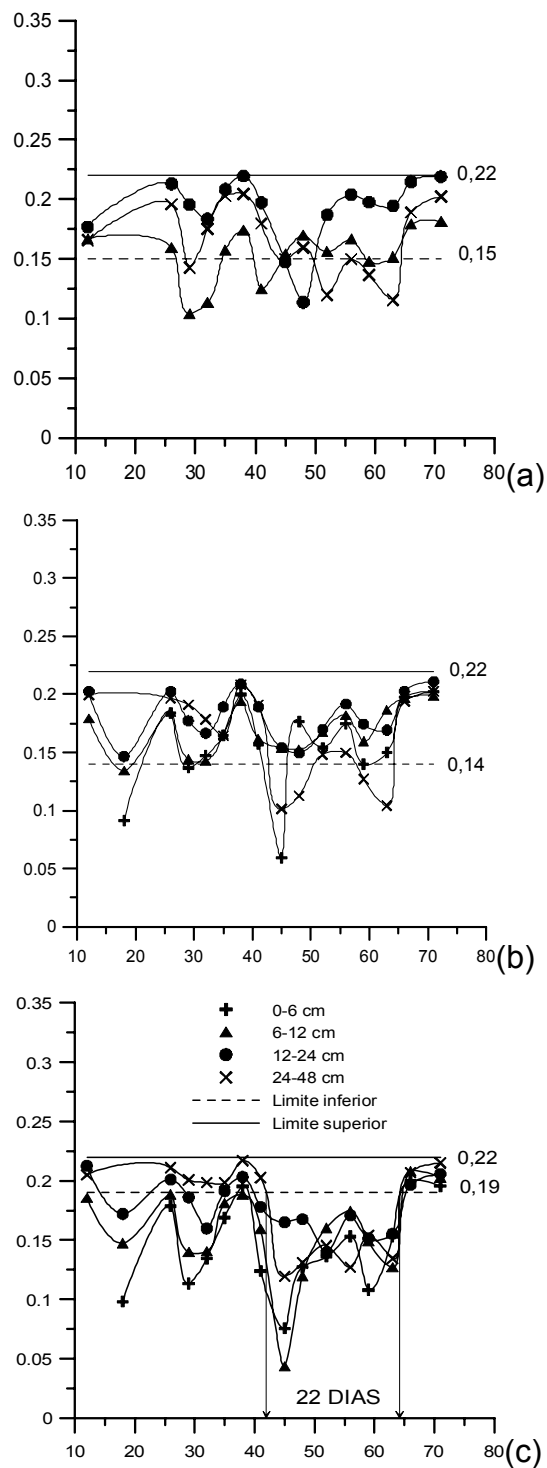


FIGURA 12 - Umidade volumétrica do solo ($\theta \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$), limite superior e inferior do IHO para os tratamentos PD (a), Esc (b) e PDC (c), no experimento 2, ao longo do ciclo do feijoeiro.

No experimento 1, a resistência à penetração aos 5 DAS foi superior a 2 MPa na camada de 6 a 25 cm para tratamento com compactação adicional (Figura 13), os demais ficaram abaixo desse limite. Esse parâmetro foi mais expressivo, atingindo valores próximos aos 4 MPa na camada de 10 cm aos 12 DAS e maior que 2 MPa até os 27 cm. Quando a umidade esteve entre 0,10 e 0,15 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, aos 43 DAS, o PDc a RP foi maior que 5 MPa na camada de 12,5 cm e, nessa época, os demais tratamentos na camada de 10 – 25 cm foram maiores que 2 MPa, influenciadas pela baixa umidade do solo.

A resistência do solo à penetração (RP), medida diretamente no campo, nos diferentes períodos (Figura 14), teve maior valor nas camadas de 10 a 15 cm para o plantio direto com e sem compactação adicional (PDc e PD), onde a densidade do solo mostrou-se maior. A escarificação do solo (Esc) mostrou-se eficiente em reduzir a compactação do solo até os 20 cm de profundidade. O plantio direto com compactação adicional (PDc) apresentou os maiores valores de RP em todas as camadas avaliadas.

Quando a umidade do solo estava entre 0,17 e 0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, aos 12 DAS, os tratamentos PD e PDc apresentaram RP superiores a 2 MPa na camada de 2,5 - 18 cm. Aos 42 DAS, a umidade do solo, com valores inferiores a 0,17 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, influenciou na resistência à penetração nos tratamentos PD e PDc que, na camada de 5 – 20 cm, foram superiores a 3 MPa e o tratamento escarificado na camada de 17,5 a 30 cm foi maior que 2 MPa. Aos 71 DAS todos os tratamentos estavam com umidade no entorno de 0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ influenciando na RP, que não foi superior a 2 MPa em todas as camadas

Nos períodos em que a umidade do solo estava dentro do IHO (acima do limite inferior e abaixo do limite superior), os valores de RP foram menores (Figura 15), sendo que apenas o plantio direto com compactação adicional (PDc) apresentou valores de RP superiores a 2 MPa, que é considerado crítico ao desenvolvimento da maioria das culturas (Taylor, 1966).

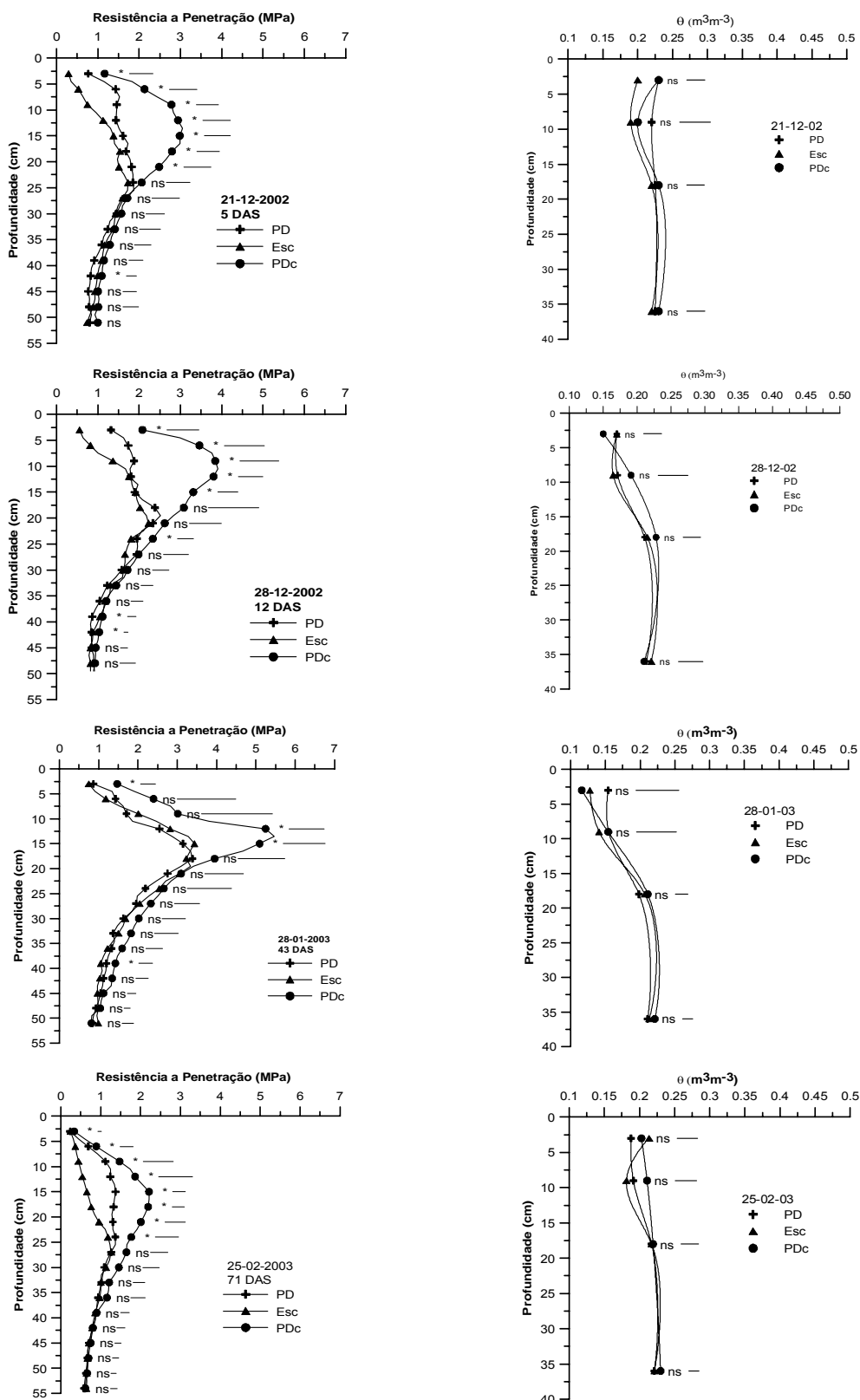


FIGURA 13 - Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo (θ) em profundidade aos 5, 12, 43 e 71 DAS, para PD, Esc e PDc, no experimento 1. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam medias dos tratamentos em cada camada.

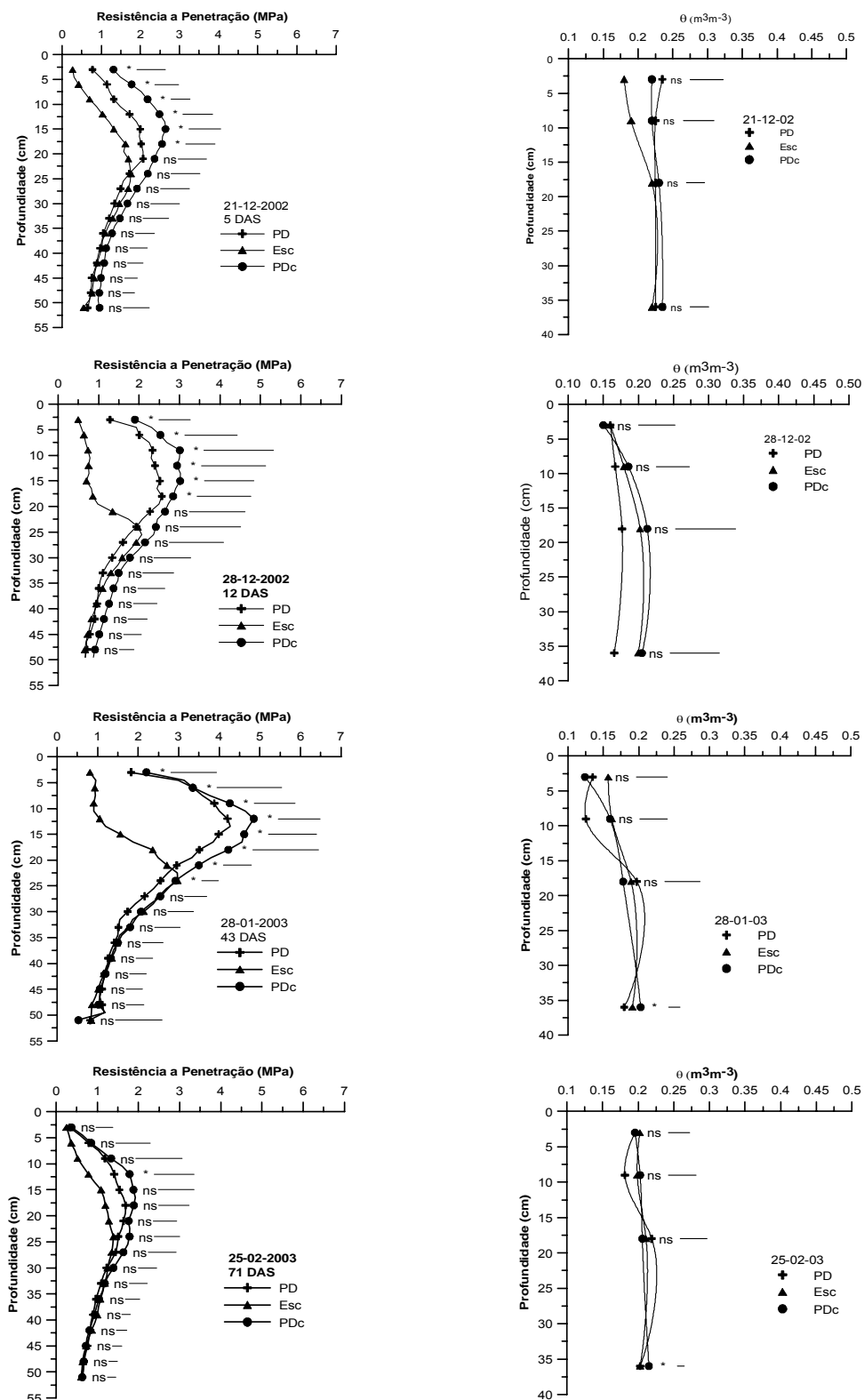


FIGURA 14 - Resistência do solo à penetração (RP) e umidade do solo (θ) em profundidade aos 5, 12, 43 e 71 DAS, para PD, Esc e PDc, no experimento 2. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam medias dos tratamentos em cada camada.

Nos períodos mais secos, onde a umidade do solo ficou abaixo do limite inferior (43 DAS), a RP mostrou-se maior principalmente para o PD e PDc. Nesse período, apenas a escarificação (Esc) manteve a RP abaixo do valor crítico (2 MPa) nos primeiros 20 cm de profundidade. Nessa fase o PDc apresentou os maiores valores de RP, no entanto, o PD também apresentou valores elevados de RP, acima do limite crítico.

A medição direta da resistência à penetração, usando penetrômetro de campo, indicou mesma tendência da indicada pelos valores do IHO, demonstrando a utilidade de medições da RP, não somente em valores de umidade do solo próximos à capacidade de campo, mas sim em toda a amplitude de umidade do IHO. As diferenças entre manejos de solo são mais claramente observadas através da RP quanto mais seco estiver o solo.

8.3.4. Desenvolvimento do sistema radicular e produtividade do feijoeiro

A distribuição do sistema radicular do feijoeiro foi afetada pelos diferentes estados de compactação (Figura 15). No tratamento 3, que recebeu compactação adicional, as raízes principais do feijoeiro concentraram-se na camada superficial. Isso provavelmente tenha ocorrido devido ao período em que a umidade do solo esteve abaixo do limite crítico que aumentou a RP, prejudicando o crescimento de raízes, principalmente a partir dos 40 dias após a semeadura onde as plantas estavam entrando em floração e o crescimento radicular tende a ser mais intenso para a maioria das culturas. Para o tratamento PD, sem compactação adicional, apenas com o resíduo de compactação referente a pressões associadas ao manejo do solo das áreas que compõem as parcelas experimentais, o sistema radicular também se concentrou na camada superficial. No tratamento Esc, ocorreu melhor crescimento e distribuição do sistema radicular, possibilitando melhor acesso à água e nutrientes.

Em resposta às restrições experimentadas pelas plantas à penetração radicular, que diminuiu o acesso à água e nutrientes, as plantas tiveram um menor desenvolvimento da sua parte aérea, ocorrendo uma queda de produtividade nos tratamentos que receberam compactação adicional causada pelo tráfego.

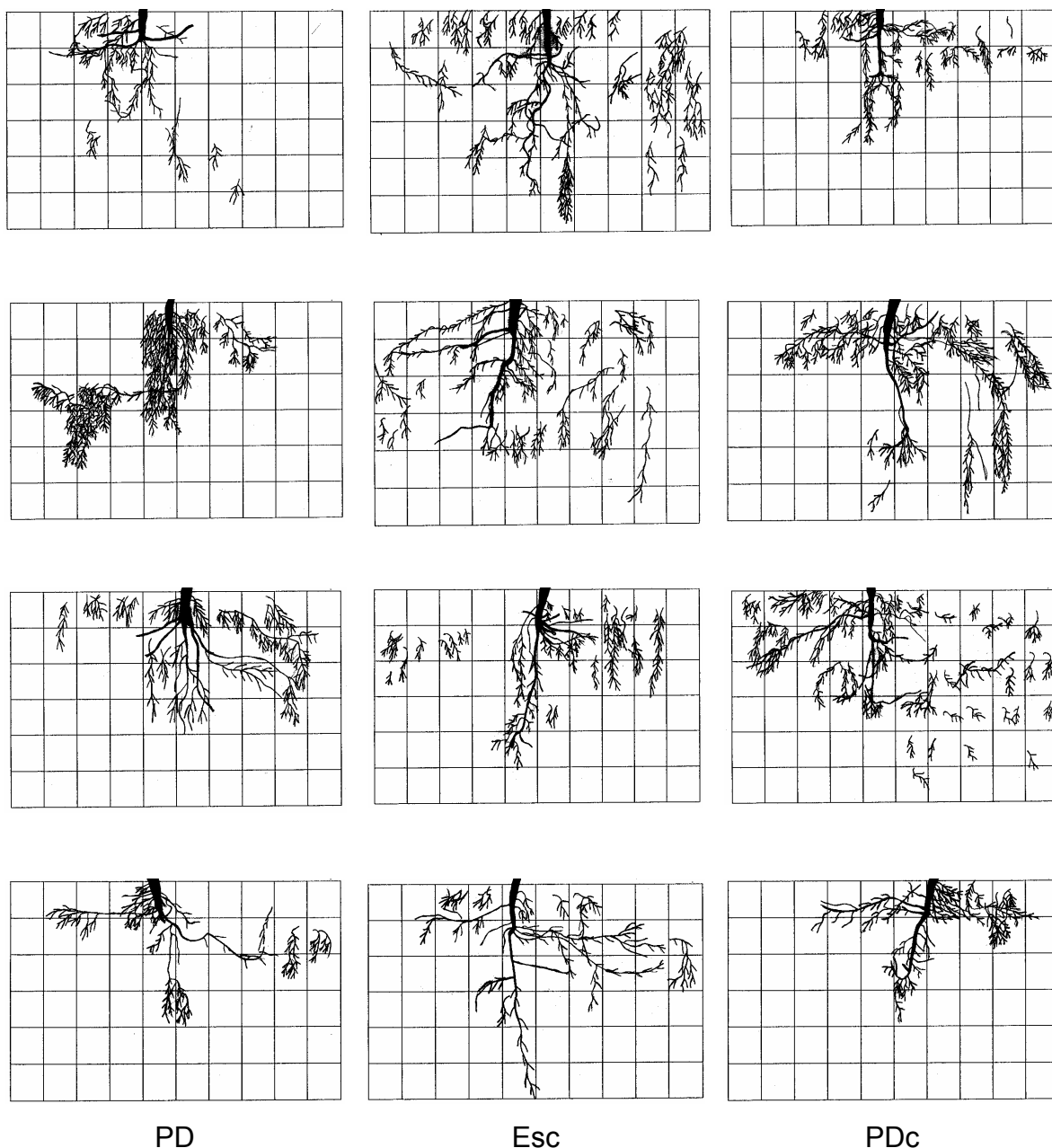


FIGURA 15 - Distribuição radicular da cultura do feijoeiro no perfil (50 x 30 cm) para os tratamentos PD - Sistema de semeadura direta sem compactação adicional, Esc - Escarificado e PDc - Sistema de Plantio direto sobre área compactada por quatro passadas de máquina de 9 Mg, quatro repetições.

No experimento 2, o estado de compactação por quatro passadas de máquina (PDc) reduziu a produtividade do feijoeiro em 57,03 %, se comparado ao tratamento Esc (Tabela 13). No plantio direto sem compactação adicional (PD), a redução da produção foi de 2,6 %, quando comparado ao escarificado (Esc), que manteve uma

faixa de umidade que não impôs restrições às plantas. No experimento 2, as diferenças observadas no PDc foram mais intensas, quando comparadas ao experimento 1, e as respostas mais negativas de produtividade possivelmente foram causadas pelas severas restrições experimentadas durante 22 dias que permaneceu com níveis de umidade em todas as camadas do solo avaliadas, 5 pontos abaixo do limite inferior que foi de $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

TABELA 13 - Produtividade da cultura do feijoeiro em função de três estados de compactação do solo.

Tratamentos	Produtividade de grãos			
	Experimento 1		Experimento 2	
	(kg ha ⁻¹)	%	(kg ha ⁻¹)	%
PD	1535 a	100,00	1401 a	97,39
Esc	1502 a	97,85	1438 a	100,00
PDc	1084 a	70,61	618 b	42,97

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

8.4. Conclusões

O valor da densidade crítica baseada do IHO é de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, semelhante aos valores de densidade do solo na camada de 10 a 20 cm, nos tratamentos que tiveram as maiores produtividades.

O IHO teve decréscimo acentuado com a compactação do solo até o valor crítico e a umidade do solo nos tratamentos mais compactados esteve fora da faixa ótima por longo período do ciclo do feijoeiro.

Considerando o IHO, a escarificação não é eficiente para atenuar os efeitos da compactação.

8.5. Literatura Citada

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1979. 190p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p (DNPEA. Boletim Técnico, 30).

BUSSCHER, W.J. Adjustemt of flat: tippet penetrometer resistense data to a common water content. **Transactions of the American Societyof Agricultural Engineers**, v.33, p.519-524, 1990.

COLLARES, G.L., REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Desenvolvimento e funcionalidade de um penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo. In : REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2004. (CD-ROOM)

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3 ed. Passo Fundo: SBCS – Núcleo Regional Sul / EMBRAPA-CNPT, 1995. 233p.

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

DOURADO-NETO, D., NIELSEN, D. R., HOPMANS, J. W . REICHERT, K., BACCHI, O. O. S. Programa computacional para modelagem de curvas de retenção de água no solo (SWRC, versão 2.00). **Sciência agrícola** [online]. jan./mar. 2000, vol.57, no.1, p.191-192.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro, 1979.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size, and soil to water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of American Journal**, v.32, p.18-186, 1968.

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

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.197-200, 1968.

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

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R; PETRY, M.T.; ROSA, G.M., CERETTA, C.A. ed. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001. p.114-133

SILVA, V.R. da. **Propriedades Físicas e Hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 160f. Tese (Doutorado em Agronomia – Biodinâmica do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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

STATICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS. **SAS/STAT Procedure guide for personal computers**. Version 5, SAS Inst. Cary, 1998.

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

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resource Research**, v.16, p.571-582, 1980.

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

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

9. CONCLUSÕES FINAIS

A densidade do solo expressou o aumento da compactação do solo provocada pelo pisoteio animal, atingindo o valor de $1,77 \text{ Mg g}^{-1}$ medida imediatamente após o pisoteio e mostrando-se mais significativa nas camadas superficiais do solo e, nessas, os efeitos na redução da macroporosidade foram mais evidentes.

Os atributos do solo avaliados revelam o estado de compactação provocado pelo pisoteio e, mesmo assumindo valores bastante elevados, não podem ser definidores da alteração no sistema de produção e sim indicadores primários da qualidade do solo.

Para o Latossolo a densidade do solo restritiva à produtividade do feijão e do trigo foi de 1,4 a $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$. Para o Argissolo, a densidade do solo restritiva à produtividade do feijoeiro foi superior a $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$. Os estados de compactação com densidade do solo maior que $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ e macroporosidade menor que $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ reduziram a altura, a área foliar e a produtividade do feijoeiro em torno de 50 %.

Os efeitos negativos da compactação adicional foram preservados após doze meses e sucessão de três cultivos (soja, aveia e feijão), reduzindo a produtividade de feijão em 61,8 %.

O valor da densidade crítica baseada no IHO foi de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$. O IHO teve decréscimo acentuado com a compactação do solo até o valor crítico e a umidade do solo nos tratamentos mais compactados esteve fora da faixa ótima por longo período do ciclo do feijoeiro.

A escarificação não representou ganho em qualidade do solo para áreas com seis anos de plantio direto em Latossolo e doze anos de plantio direto em Argissolo que implicasse em aumento de produtividade.