



UFSM

TESE DE DOUTORADO

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS EM SOLOS SOB DIFERENTES
ESTADOS DE COMPACTAÇÃO**

Vanderlei Rodrigues da Silva

PPGA

Santa Maria, RS, Brasil

2003

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS EM SOLOS SOB DIFERENTES
ESTADOS DE COMPACTAÇÃO**

por

Vanderlei Rodrigues da Silva

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia,
Área de Concentração em Biodinâmica do Solo, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para
obtenção do grau de **Doutor em Agronomia**

PPGA

Santa Maria, RS, Brasil

2003

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Agronomia

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

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS EM SOLOS SOB DIFERENTES
ESTADOS DE COMPACTAÇÃO**

elaborada por
Vanderlei Rodrigues da Silva

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Agronomia

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Miguel Reichert
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert

Reimar Carlesso

Jackson Adriano Albuquerque

Vilson Antônio Klein

Santa Maria, 7 de fevereiro de 2003

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e ao Departamento de Solos, que possibilitaram a realização deste trabalho.

À CAPES, ao CNPq e FAPERGS, pela importante ajuda financeira, tanto em bolsa quanto em recursos para a execução do projeto de pesquisa.

Ao professor orientador José Miguel Reichert e aos demais integrantes da comissão de orientação, pela dedicação, amizade e orientação.

Aos colegas de curso, tanto de doutorado como de mestrado, que nos ajudaram e foram importantes para a execução, andamento e conclusão deste trabalho, assim como nos momentos de descontração.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial ao Flávio Fontinelli, que sempre nos ajudaram compartilhando suas experiências nos trabalhos de campo e de laboratório e no convívio diário.

Ao prof. Álvaro Pires da Silva e aos funcionários e alunos de pós-graduação do Laboratório de Física da ESALQ/USP pelo empréstimo de equipamentos e auxílio na determinação do intervalo hídrico ótimo.

Agradeço de maneira especial, àqueles bolsistas de iniciação científica e colaboradores que, não importando a dimensão ou a importância do trabalho, o realizaram de forma brilhante e com qualidade.

A todo o Departamento Técnico da COTRIJUÍ, representado pelo Eng. Agr. Jair da Silva Mello pela colaboração na escolha da área experimental.

Aos proprietários das lavouras das áreas experimentais, Sr. Arnaldo Yank, de Coronel Barros, e Eng. Agr. Ulfried Arns, de Cruz Alta, que colocaram a nossa disposição toda a estrutura de suas propriedades.

Aos amigos de todas as horas, alguns geograficamente mais distantes outros nem tanto, o meu muito obrigado.

Enfim, agradeço o apoio da família que foi muito importante para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	XVI
ABSTRACT	XIX
INTRODUÇÃO GERAL	1
HIPÓTESES.....	3
OBJETIVO GERAL	4
REVISÃO DE LITERATURA	5
Compactação e desenvolvimento de plantas.....	5
Água no solo	11
CAPÍTULO 1. VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO	16
RESUMO.....	16
INTRODUÇÃO	17
MATERIAL E MÉTODOS.....	19
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
CONCLUSÕES	33
CAPÍTULO 2. INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE TRÊS CLASSES DE SOLOS EM PLANTIO DIRETO.	34
RESUMO.....	34
INTRODUÇÃO	35
MATERIAL E MÉTODOS.....	39
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
Limite crítico de resistência do solo à penetração de 2 MPa	45
Limite crítico de resistência do solo à penetração de 3 MPa	53
Limite crítico de resistência do solo à penetração de 1 MPa	57
CONCLUSÕES	61
CAPÍTULO 3. PARÂMETROS HÍDRICOS DO SOLO EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	62
RESUMO.....	62
INTRODUÇÃO	63
MATERIAL E MÉTODOS.....	67
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
Análise Granulométrica do solo.	70
Infiltração de água no solo	74
Condutividade hidráulica em solo saturado e em solo não saturado .	76
Retenção de água no solo e capacidade de campo	86
CONCLUSÕES	89
CAPÍTULO 4. QUALIDADE ESTRUTURAL DE DOIS LATOSSOLOS E PRODUÇÃO DE CULTURAS ANUAIS.....	91
RESUMO.....	91
INTRODUÇÃO	92

MATERIAL E MÉTODOS	95
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
Densidade e porosidade do solo	98
Época 1, novembro de 1999.....	98
Época 2, setembro de 2001.....	102
Resistência mecânica à penetração radicular e agregação do solo	110
Estados de compactação e produtividade de plantas	117
CONCLUSÕES	122
CAPÍTULO 5. INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO, TEMPERATURA DO SOLO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO EM TRÊS SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO.	124
RESUMO.....	124
INTRODUÇÃO	125
MATERIAL E MÉTODOS.....	129
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	132
Temperatura do solo em três sistemas de manejo do solo	132
Densidade do solo e resistência mecânica à penetração de raízes.	137
Distribuição radicular, limite superior e inferior de umidade do solo e produtividade do feijoeiro.....	142
CONCLUSÕES	148
CONCLUSÕES GERAIS.....	149
SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	150
LITERATURA CITADA.....	151

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1. Valores de média, mediana (Med), moda (Mo), amplitude (Ampl), coeficiente de variação (CV em %), assimetria (Ass), curtose (Curt) e teste de Kolmorow (W) para a resistência à penetração (MPa) em diferentes profundidades nas três classes de solos sob plantio direto. 24
- TABELA 2. Estimativa dos parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A) e relação efeito pepita/patamar ($1-(C_0/C_0+C_1)$) para os modelos ajustados aos semivariogramas, para os três tipos de solos analisados. 26
- TABELA 3. Valores médios, máximo e mínimo para a resistência do solo à penetração (RP), da umidade volumétrica do solo (θ) e da densidade do solo (D_s). 42
- TABELA 4. Valores dos parâmetros estimados para o modelo da curva de resistência do solo para três tipos de solos em três estados de compactação. 42
- TABELA 5. Valores de condutividade hidráulica em solo saturado (cm h^{-1}) determinada em laboratório, para distintas profundidades em três estados de compactação. 77
- TABELA 6. Valores de condutividade hidráulica em solo saturado no campo (K_{sat} em cm h^{-1}), em dois Latossolos sob plantio direto. Médias de 6 repetições. 79
- TABELA 7. Valores da umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do solo 24 horas após o início da drenagem comparadas com a umidade obtida nas curvas de retenção de água (CRA) na tensão de -10 kPa. 89
- TABELA 8. Distribuição do diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água nos diferentes estados de compactação e no escarificado, em três profundidades no Latossolo Vermelho distrófico (LE) e no Latossolo Vermelho distroférrico típico (LR). 116
- TABELA 9. Produtividade (Mg ha^{-1}) de trigo, soja e milho nos diferentes estados de compactação, nos dois solos. 118
- TABELA 10. Temperatura máxima, mínima e amplitude térmica em duas profundidades e em diferentes sistemas de manejo do solo. 133
- TABELA 11. Produtividade do feijoeiro nos diferentes sistemas de preparo do solo. 148

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. Croqui dos pontos amostrados no Argissolo Vermelho-Amarelo em Santa Maria, RS. Asteriscos indicam os pontos amostrados. 21
- FIGURA 2. Croqui dos pontos amostrados das áreas no Latossolo Vermelho distrófico em Cruz Alta, RS e no Latossolo Vermelho distroférico típico, em Coronel Barros. Asteriscos indicam os pontos amostrados. 22
- FIGURA 3. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP) em várias profundidades em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. 27
- FIGURA 4. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP) em várias profundidades em um Latossolo Vermelho distrófico. 29
- FIGURA 5. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP) em várias profundidades em um Latossolo Vermelho distroférico típico. 30
- FIGURA 6. Superfície de resistência do solo à penetração na profundidade de 7,5 cm, no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, identificando os estados de compactação. 32
- FIGURA 7. Superfície de resistência do solo à penetração na profundidade de 7,5 cm, no Latossolo Vermelho distrófico, identificando os estados de compactação. 32
- FIGURA 8. Superfície de resistência do solo à penetração na profundidade de 7,5 cm, no Latossolo Vermelho distroférico típico, identificando os estados de compactação. 33
- FIGURA 9. Relação da resistência do solo à penetração estimada pelo modelo de Busscher (1990) e resistência do solo medida. 43
- FIGURA 10. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis críticos da porosidade de aeração (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo. 46
- FIGURA 11. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis críticos da porosidade de aeração (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração (θ_{rp}) e ponto de murcha

permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 47

FIGURA 12. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis críticos da porosidade de aeração (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 48

FIGURA 13. Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, para $\theta_{ar} = 10\%$, $\theta_{0,01}$ a umidade na tensão de 0,01 MPa (capacidade de campo), $\theta_{rp} = 2$ MPa e $\theta_{1,5}$ = umidade no ponto de murcha permanente. 51

FIGURA 14. Valores de água disponível no solo, compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, em função do aumento da densidade do solo. 52

FIGURA 15. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 54

FIGURA 16. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo a penetração de 3 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 55

FIGURA 17. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 56

FIGURA 18. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 1 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 58

FIGURA 19. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 1 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha

- permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 59
- FIGURA 20. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 1 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo. 60
- FIGURA 21. Valores da análise granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico..... 72
- FIGURA 22. Valores da análise granulométrica do Latossolo Vermelho distroférico típico..... 73
- FIGURA 23. Taxa de infiltração no tempo nos diferentes estados de compactação, para o Latossolo Vermelho Distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico típico. Média de 6 repetições, * significativa a 5% de probabilidade..... 74
- FIGURA 24. Lâmina infiltrada acumulada nos diferentes estados de compactação. Média de 6 repetições. * significativo a 5 % de probabilidade..... 76
- FIGURA 25. Relação entre a condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) determinada em laboratório e a macroporosidade do solo nos diferentes estados de compactação e na área escarificada. * significativo a 5% de probabilidade..... 78
- FIGURA 26. Valores de umidade volumétrica em função do tempo de drenagem. Linha vertical indica a umidade na capacidade de campo, 24 horas após o início da drenagem, no Latossolo Vermelho distrófico. 81
- FIGURA 27. Valores da umidade volumétrica do solo durante a redistribuição de água no solo com maior, intermediário e menor estado de compactação em plantio direto e no tratamento escarificado..... 83
- FIGURA 28. Valores do potencial matricial durante a redistribuição de água no solo com maior, intermediário e menor estado de compactação sob plantio direto e no tratamento escarificado. 84
- FIGURA 29. Condutividade hidráulica em solo não saturado em função da umidade volumétrica do solo em diferentes profundidades, em três estados de compactação e na área escarificada..... 85

- FIGURA 30. Curva de retenção de água e ajuste do modelo de Van Genuchten, no Latossolo Vermelho distrófico..... 87
- FIGURA 31. Curva de retenção de água e ajuste do modelo de Van Genuchten, no Latossolo Vermelho distroférico típico..... 88
- FIGURA 32. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Barras horizontais comparam os estados de compactação para a mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$). Coletado em novembro de 1999. 99
- FIGURA 33. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Barras horizontais comparam os estados de compactação para a mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$). Coletado em novembro de 1999. 101
- FIGURA 34. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Barras horizontais comparam tratamento na mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$). Coletado em setembro de 2001. 103
- FIGURA 35. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Barras horizontais comparam tratamento na mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$) em setembro de 2001. 106
- FIGURA 36. Percentagem acumulada de poros de determinado diâmetro, num Latossolo Vermelho distrófico. Linha vertical indica poros com $53\ \mu\text{m}$. .. 108
- FIGURA 37. Percentagem acumulada de poros de determinado diâmetro, num Latossolo Vermelho distroférico típico. Linha vertical indica poros com $53\ \mu\text{m}$ 109
- FIGURA 38. Valores de resistência mecânica do solo à penetração e umidade volumétrica do solo ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Determinado em maio de 2000..... 110
- FIGURA 39. Valores de resistência mecânica do solo à penetração (a) e umidade volumétrica do solo (b) ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Determinado em outubro de 2001. 112
- FIGURA 40. Valores de resistência mecânica do solo à penetração e umidade volumétrica do solo ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho

- distroférico típico. Determinado em maio de 2000. Obs. Nessa umidade, o tratamento maior estado de compactação não foi possível realizar a leitura no penetrógrafo..... 113
- FIGURA 41. Valores de resistência mecânica do solo à penetração e umidade volumétrica do solo ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Determinada em outubro de 2001. 115
- FIGURA 42. Densidade de raízes de soja ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico na safra de 1999/2000. 121
- FIGURA 43. Valores de precipitação mais irrigação durante o ciclo da cultura do feijoeiro..... 131
- FIGURA 44. Valores de temperatura do solo durante o ciclo do feijoeiro em três sistemas de manejo do solo. (PD= plantio direto; PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido) 135
- FIGURA 45. Variação da temperatura diária do ar e do solo para o dia 02/12/2001, 4 dias após a emergência do feijoeiro, em três sistemas de manejo do solo. (PD= plantio direto; PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido) 136
- FIGURA 46. Variação da temperatura diária do ar e do solo para o dia 01/01/2002, 35 dias após a emergência do feijoeiro, em três sistemas de manejo do solo. (PD= plantio direto; PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido) 137
- FIGURA 47. Valores de densidade do solo ao longo do perfil do solo nos três sistemas de manejo do solo. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade. 138
- FIGURA 48. Valores de resistência à penetração e umidade volumétrica ao longo da profundidade nos três sistemas de manejo do solo, em três distintos dias. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade. 140
- FIGURA 49. Valores de resistência mecânica à penetração ao longo do ciclo do feijoeiro para três sistemas de manejo do solo e quatro profundidades. Linhas verticais indicam a diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada dia avaliado..... 141

FIGURA 50. Desenho da distribuição do sistema radicular do feijoeiro no plantio direto.....	143
FIGURA 51. Desenho da distribuição do sistema radicular do feijoeiro no preparo convencional de solo.	144
FIGURA 52. Desenho da distribuição do sistema radicular do feijoeiro no preparo reduzido de solo.....	144
FIGURA 53. Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo do feijoeiro, em quatro profundidades no plantio direto.....	146
FIGURA 54. Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo do feijoeiro, em quatro profundidades no preparo convencional.	147
FIGURA 55. Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo do feijoeiro, em quatro profundidades no preparo reduzido.	147

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Valores de umidade gravimétrica do solo na determinação dos estados de compactação, no Argissolo Vermelho-Amarelo.....	167
ANEXO B. Valores de umidade gravimétrica do solo na determinação dos estados de compactação, no Latossolo Vermelho distrófico.....	168
ANEXO C. Valores de umidade gravimétrica do solo na determinação dos estados de compactação, no Latossolo Vermelho distroférico típico.....	169
ANEXO D. Relação entre a quantidade de água retida no potencial de -1,5 MPa em amostras com estrutura preservada e amostras com estrutura alterada.	170
ANEXO E. Parâmetros empíricos da equação $K_{\theta} = a e^{b \cdot \theta}$	171

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	-	Umidade volumétrica do solo
$\theta_{0,01}$	-	Umidade volumétrica do solo no potencial de – 0,01 MPa
$\theta_{1,5}$	-	Umidade volumétrica do solo no potencial de – 1,5 MPa.
θ_{ar}	-	Umidade volumétrica do solo quando a porosidade de aeração é de 10 %.
θ_{rp}	-	Umidade volumétrica do solo quando a resistência mecânica à penetração é de 2 MPa.
DMG	-	Diâmetro médio geométrico de agregados
Ds	-	Densidade do Solo
EC	-	Estado de compactação
IHO	-	Intervalo hídrico ótimo
K_{sat}	-	Condutividade hidráulica em solo saturado
K_{θ}	-	Condutividade hidráulica não saturada
PC	-	Preparo convencional
PD	-	Plantio direto
PR	-	Preparo reduzido
PT	-	Porosidade total
RP	-	Resistência mecânica à penetração
LE		Latossolo Vermelho distrófico
LR		Latossolo Vermelho distroférico típico

RESUMO

Tese de doutorado
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS EM SOLOS SOB DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO

Autor: Vanderlei Rodrigues da Silva

Orientador: José Miguel Reichert

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 7 de fevereiro de 2003.

A compactação do solo altera atributos do solo que, direta e indiretamente, afetam o crescimento e produção das plantas, provocando redução de produtividade e degradando o solo. Os objetivos foram: estudar a variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em lavouras sob plantio direto; identificar estados de compactação em lavouras sob plantio direto; estimar valores de densidade do solo onde as condições físicas para o desenvolvimento de plantas não sejam limitantes; verificar o efeito dos estados de compactação na infiltração e condutividade de água no solo; medir a produtividade de grãos de trigo, soja e milho em diferentes estados de compactação; e, monitorar a umidade e a resistência do solo durante todo o ciclo do feijoeiro em três sistemas de manejo do solo. Utilizaram-se três tipos de solos com diferentes teores de argila, um Argissolo Vermelho-Amarelo, localizado em Santa Maria-RS apresentando 120 g kg^{-1} de argila na camada de 0-20 cm, um Latossolo Vermelho distrófico, localizado em Cruz Alta-RS, com 500 g kg^{-1} de argila na camada de 0-20 cm e um Latossolo Vermelho distroférico típico, localizado em Coronel Barros-RS, com 680 g kg^{-1} de argila

na camada de 0-20 cm. Em uma área de 450 m² no Argissolo e 1500 m² nos Latossolos, foi determinada a resistência mecânica do solo, de maneira orientada, formando uma malha de 3 x 4 metros no Argissolo e 2 x 5 metros nos Latossolos. Usando os dados de resistência à penetração foram identificados três estados de compactação em cada área, o qual, chamamos de Maior estado de compactação, Intermediário estado de compactação e Menor estado de compactação. Esses estados de compactação foram os tratamentos para os capítulos 2, 3 e 4. No verão do ano 2000, adicionou-se o tratamento escarificado nos Latossolos. Foram realizadas determinações de densidade, porosidade, macro e microporosidade, infiltração e condutividade hidráulica em solo saturado, no campo e no laboratório, e medições da produtividade de grãos de trigo, soja e milho. Determinou-se o intervalo hídrico ótimo para os três tipos de solos e, utilizando os valores do conteúdo de água no limite inferior e no limite superior do intervalo hídrico ótimo, monitorou-se a umidade do solo durante todo o ciclo do feijoeiro, em um Argissolo sob três sistemas de cultivo (plantio direto, preparo reduzido e preparo convencional). Os principais resultados obtidos indicaram que a compactação do solo foi maior nas extremidades da lavoura, região conhecida como “cabeceira” e o estado de compactação foram reduzindo para o centro da lavoura. Os valores de densidade do solo onde o intervalo hídrico ótimo é zero foram decrescentes com o teor de argila do solo e não foi influenciado pelos estados de compactação. No Argissolo, o valor da densidade crítica foi de 1,80 Mg m⁻³, no Latossolo Vermelho distrófico foi de 1,43 Mg m⁻³ e no Latossolo Vermelho distroférico típico foi de 1,40 Mg m⁻³. Nos Latossolos, os resultados de resistência mecânica à penetração e densidade do solo identificaram a presença de uma camada compactada na profundidade de 7,5 cm a 12,5 cm. A produtividade do trigo foi reduzida em 18 % e 34 % no maior estado de compactação comparado com o menor estado de compactação, no Latossolo Vermelho distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico típico, respectivamente. A produtividade de milho foi reduzida, no Latossolo Vermelho distrófico, em 1490 kg ha⁻¹ no intermediário estado de compactação em relação

ao tratamento escarificado, e no Latossolo Vermelho distroférico típico em 2780 kg ha^{-1} no maior estado de compactação em relação ao tratamento escarificado. Em dois anos, no Latossolo Vermelho distrófico e em um ano no Latossolo Vermelho distroférico típico, a produtividade de soja diferiu entre os estados de compactação, indicando que, ao contrário do trigo e do milho, a soja não foi sensível aos estados de compactação existentes nas áreas experimentais. A infiltração de água no solo não se correlacionou com os estados de compactação, já o contrário foi verificado para a condutividade hidráulica em solo saturado determinada diretamente no campo, a qual foi menor para o maior estado de compactação e maior no menor estado de compactação. Nos três sistemas de cultivo no Argissolo, a quantidade de dias em que o solo permaneceu abaixo das condições ideais de umidade foi de 18 dias no plantio direto, 19 dias no preparo convencional e 13 dias no preparo reduzido. Porém, a produtividade do feijoeiro não diferiu entre os sistemas de cultivo, indicando que os limites críticos, principalmente de resistência mecânica à penetração, podem ser maiores que os 2 MPa considerados na metodologia de determinação do intervalo hídrico ótimo.

ABSTRACT

Tese de doutorado
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

**PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS EM SOLOS SOB
DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO**

**(Soil Physical and water parameters under different soil compaction
state)**

Author: Vanderlei Rodrigues da Silva

Major professor: José Miguel Reichert

Date and Place of Defense: Santa Maria, February 7, 2003.

Soil compaction alters soil attributes that directly and indirectly affect plant growth and yield. The objectives of this study were: to identify the state of soil compaction in farms under no tillage; estimate soil bulk density values where soil physical conditions are not limiting for plant development; verify the effect of the state of soil compaction on water infiltration and hydraulic conductivity; measure wheat, soybeans and corn yield grown in different soil compaction state; and, determine water content and soil penetration resistance during bean growth in three soil management systems. Three soil types with different clay content were used: an Hapludalf located in Santa Maria-RS, with 120 g clay kg⁻¹ in the 0-20 cm layer, an Haplortox located in Cruz Alta-RS, with 500 g clay kg⁻¹ in the 0-20 cm layer, and a Hapludox located in Coronel Barros-RS, with 680 g clay kg⁻¹ in the 0-20 cm layer. In a total area of 450 m² for the Hapludalf and of 1500 m² for the Oxisols, soil penetration resistance was determinate in grids of 3 x 4 meters for the Hapludalf and of 2 x 5 meters for the Oxisols. Three areas of distinct compaction states were delineated in each area

based on soil penetration resistance, viz. large, intermediary and small compaction state. In the summer of 2000, chisel treatment was added on the Oxisols. We evaluated the soil bulk density, porosities, water infiltration and saturated hydraulic conductivity, in the field and in the laboratory, and measured the yield of wheat, soybeans and corn. The least limiting water range was determined for the three soils and, using the values of water content in the lower limit and in the upper limit of the least limiting water range, the soil water content was monitored in three cultivation systems (no tillage, chisel tillage and conventional tillage) for the Hapludalf during the bean growth. Soil penetration resistance was greatest at the borders of the farm and least towards the center of the field. The values of bulk density, where the least limiting water range is zero, decreased with increased clay content and it was not influenced by the soil compaction state. The value of the critical bulk density was $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ for the Hapludalf, $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ for the Haplortox, and $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ for the Rodic Hapludox. Results of soil penetration resistance and bulk density indicated the presence of a compacted layer at 7.5 cm to 12.5 cm soil depth. The wheat yield for the large soil compaction state, compared with the small soil compaction state, was 18% lesser for the Haplortox and 34% for the Rodic Hapludox. In the second year of experiment a chisel treatment was added, and corn yield was decreased in 1490 kg ha^{-1} , for the intermediary soil compaction state for comparison to chisel for the Haplortox, and in 2780 kg ha^{-1} , for the larger soil compaction state in comparison to chisel for the Rodic Hapludox. For the two years for the Haplortox and for one year for the Rodic Hapludox, the soybean yield did not differ among the soil compaction states, indicating that, unlike for wheat and corn, soybean was not sensitive to the soil compaction state. Water infiltration was not correlated with soil compaction state, while the opposite was observed for the saturated hydraulic conductivity determined in the field, where values were least for the large soil compaction state and greatest for the small soil compaction state. For three soil management systems for the Hapludalf, the number of days in which soil water content was below the lower limit was of 18 days for the no tillage, 19 days for the conventional system, and 13 days for the

reduced system. However, the bean yield did not differ among the management systems, indicating that the critical limits, mainly of soil resistance to penetration can be larger than 2 MPa considered in the methodology of determination of the least limiting water range.

INTRODUÇÃO GERAL

No Rio Grande do Sul, o plantio direto abrange uma área de aproximadamente 3,5 milhões de hectares e, no Brasil, cerca de 13 milhões de hectares, quase um terço da área cultivada com culturas anuais. Essa prática de manejo do solo reduz consideravelmente as perdas de solo por erosão, pois a semeadura é realizada diretamente sobre os resíduos da cultura anterior, mantendo-se a cobertura do solo que dissipa o impacto da gota da chuva e é um impedimento ao escoamento superficial de água no solo.

Uma das melhorias esperadas no plantio direto é a formação de uma rede estável de macroporos, originário da atividade de macro e meso organismos do solo e da ação do sistema radicular das culturas antecessora, elevando a infiltração e o armazenamento de água no solo, reduzindo a erosão, manutenção e pequeno aumento da matéria orgânica, refletindo em menor flutuação da produtividade ao longo dos anos. Porém, dependendo das condições de implantação e manejo do plantio direto, em muitas lavouras, verificou-se um aumento do estado de compactação, com aumento de densidade do solo e da resistência mecânica à penetração e redução da macroporosidade. Esse aumento do estado de compactação originou-se do acúmulo de pressões provocadas pelas rodas das máquinas agrícolas ou pelo pisoteio animal, pois, como não há revolvimento do solo, as pressões vão acumulando-se no solo e aumentando o estado de compactação. Esse processo é agravado pela umidade do solo, a qual, geralmente, é maior no plantio direto.

Em entrevista realizada pelas entidades participantes da Plataforma Plantio Direto, agricultores de todo o Brasil responderam que a falta de crédito, o alto investimento inicial na compra ou adaptação de semeadoras e a compactação do solo foram as principais restrições para o estabelecimento e continuidade do plantio direto em suas lavouras (Plataforma plantio direto, 2000). Porém, persistem dúvidas se esse aumento do estado de compactação

estaria provocando restrições e, em que grau, ao desenvolvimento e produtividade de plantas.

A compactação do solo é um processo bastante complexo, envolvendo propriedades do solo e a resposta das plantas. A avaliação da compactação do solo requer estudos e determinação de limites críticos de diversas propriedades do solo, as quais, dependendo das condições climáticas, do manejo do solo e do tipo de planta, podem variar de ano para ano. Por isso, quando se pretende avaliar o efeito da compactação no desenvolvimento de plantas, existem dúvidas na escolha da propriedade do solo que melhor caracterize as conseqüências da compactação, em qual época do ano ou em qual estágio de desenvolvimento da planta que se deve medir e, em que condições de umidade do solo.

Em lavouras, o estado de compactação é variável conforme o sistema de rotação de culturas, o manejo do solo e o sistema de tráfego das máquinas. Nas extremidades da lavoura, a compactação é maior, devido ao tráfego intenso das máquinas nessa posição da lavoura e acaba provocando desuniformidade no estado atual de compactação do solo. Além disso, existe a estratificação da compactação do solo em profundidade, implicando em camadas de impedimento ao crescimento radicular, movimento de água e trocas gasosas. Dentro de uma mesma gleba, as plantas podem experimentar diferentes condições físicas do solo, devido ao sistema e à intensidade do tráfego das máquinas sobre a lavoura. A compactação é uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo e provoca degradação do solo.

Os chamados limites críticos das propriedades físicas do solo ao desenvolvimento das plantas, interagem entre si e com as condições climáticas, por isso são de difícil mensuração e necessitam serem analisadas de forma conjunta. A quantidade e o potencial de água no solo interage com as propriedades físicas do solo que afetam diretamente a produção das plantas, mas, conhecendo-se os limites críticos, pode-se delimitar faixas de umidade do solo onde os fatores físicos diretamente relacionados à produção de plantas são nulos ou sem restrições econômicas à produção das plantas. Tal índice de

qualidade estrutural deve ser sensível a variações no sistema de manejo do solo e ser apto para indicar a necessidade de manejo para tornar o solo adequado ao desenvolvimento das plantas.

Valores de densidade do solo e de resistência mecânica à penetração críticas ao desenvolvimento radicular determinadas em vasos nem sempre se correlacionam com os valores críticos verificados em estudos na condição de campo. No campo, principalmente em solos estruturados, as raízes procuram fendas, rachaduras, poros e áreas de menor resistência para crescerem e mesmo com valores altos de resistência à penetração e densidade do solo, não é verificada redução de produtividade. Devido a essas interações, a produtividade de plantas e as propriedades físicas do solo são de difícil mensuração e dependentes das condições climáticas.

Para facilitar a discussão dos resultados, o trabalho foi dividido em capítulos, os quais, tratam de assuntos relacionados à influência dos estados de compactação encontrados em lavouras sob plantio direto no Rio Grande do Sul com parâmetros físico-hídricos do solo e a produtividade de culturas anuais.

HIPÓTESES

À ausência de revolvimento do solo e o tráfego de máquinas em lavouras sob plantio direto provocam variações no estado de compactação, sendo que o maior estado de compactação ocorre nas extremidades da lavoura.

Na mesma classe de solo, a densidade crítica diminui com o aumento do estado de compactação.

A infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo são reduzidas com o aumento do estado de compactação, porém maior quantidade de água ficará retida no maior estado de compactação para o mesmo tipo de solo.

Os valores de densidade do solo e de resistência à penetração existentes no maior estado de compactação reduzem a produtividade de grãos de trigo, milho e soja.

Modificações no estado de compactação alteram a amplitude do conteúdo de água em que as condições físicas não são limitantes ao desenvolvimento das plantas.

OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito de diferentes estados de compactação, em solo sob plantio direto e sob preparo reduzido, nas propriedades físico-hídricas e a resposta das plantas a essas alterações.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar a variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em lavouras sob plantio direto.

Identificar limites críticos de densidade do solo onde a resistência mecânica à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento das plantas, utilizando a metodologia do intervalo hídrico ótimo.

Avaliar a infiltração, a condutividade hidráulica em solo saturado e não saturado e a curva de retenção de água em diferentes estados de compactação do solo.

Monitorar a quantidade de água no solo com o período em que o solo apresenta umidade abaixo ou acima das condições físicas consideradas ótimas, determinadas pelo intervalo hídrico ótimo.

Relacionar a produtividade das culturas de soja, milho, feijão e trigo com valores de densidade do solo e resistência mecânica à penetração de raízes em diferentes sistemas de manejo do solo.

REVISÃO DE LITERATURA

Compactação e desenvolvimento de plantas

O plantio direto foi desenvolvido com a finalidade de eliminar a mobilização superficial e manter a superfície do solo protegida com resíduos culturais, buscando-se assim, aumentar a matéria orgânica, reduzir a erosão do solo, o consumo de mão-de-obra, a utilização de máquinas e de combustíveis (Johnson et al., 1984; Soane & van Ouwerkerk, 1994; Seganfredo et al., 1997; Barum, 1999; Tavares Filho et al., 2001). Entre outros benefícios, é um sistema de manejo do solo amplamente difundido na região sul do Brasil e avançou para as regiões do cerrado brasileiro (Hernani & Salton, 1998).

O aumento na produtividade das culturas com a implantação do plantio direto depende das condições edafoclimáticas e do próprio manejo utilizado nesse sistema. Estudos do potencial de produção em diferentes sistemas de manejo indicaram que em solos mal drenados e frios, no plantio direto a produtividade relativa foi menor do que no preparo convencional (Johnson et al., 1984). O contrário foi verificado nos solos bem drenados e em regiões mais quentes, principalmente, onde a umidade do solo, mesmo em curtos períodos de deficiência hídrica, pode limitar a produtividade. Lowery & Schuler (1991) verificaram que os efeitos do tráfego de máquinas pesadas (até 12,5 Mg por eixo) persistiram por mais de quatro anos, em dois tipos de solos da região de Madison-USA. Nos quatro anos, a altura das plantas de milho foi menor na área que recebeu a maior compactação nos dois tipos de solos e a produtividade foi menor no primeiro ano nos dois tipos de solos e após quatro anos, no solo argilo-siltoso ainda houve redução de produtividade de milho. Na Austrália, a compactação do solo provocada pelo tráfego de máquinas reduziu a emergência e a produtividade de trigo, sorgo e milho (Radford et al., 2001). A redução média de produtividade de trigo, sorgo e milho em comparação com o tratamento não compactado foi de 23 % ou 790 kg ha⁻¹ na situação de maior

carga por eixo (10 Mg) e 13 % ou 440 kg ha⁻¹ no tratamento com 6 Mg de carga por eixo (Radford et al., 2001). Busscher et al. (2001) verificaram redução de produtividade de milho entre 500 kg ha⁻¹ a 2400 kg ha⁻¹ para cada MPa de aumento médio da resistência à penetração em dois solos siltosos dos Estados Unidos. Em um Nitossolo Vermelho da região de Lages (SC), a produtividade de milho na safra 98/99 foi reduzida em 560 kg ha⁻¹ no plantio direto (6,40 Mg ha⁻¹) quando comparado com o sistema convencional de manejo do solo (6,96 Mg ha⁻¹), ambos com pisoteio animal durante o inverno (Albuquerque et al., 2001).

Em plantio direto, a produtividade das plantas é bastante variável em função das condições climáticas e de como é realizado o manejo do sistema plantio direto. Em situações em que o manejo dado ao plantio direto proporciona manutenção da umidade do solo, juntamente com rotações de culturas que proporcionam aumento de matéria orgânica, melhorando propriedades físicas e, especialmente, diminuição da erosão do solo a resposta das plantas no plantio direto é positiva em relação aos sistemas que revolvem o solo. Porém quando o plantio direto é realizado sem rotação de culturas e o tráfego de máquinas é realizado com elevada umidade do solo, observa-se aumento do estado de compactação e formação de crosta superficial com redução da produtividade das plantas em lavouras em relação a lavouras com algum revolvimento do solo. É amplamente entendido que o sistema convencional provoca destruição da estrutura do solo, com conseqüências na diminuição da infiltração de água no solo, provocando 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).

Apesar dos benefícios do plantio direto, há estudos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetidos a esse sistema (Hakansson et al., 1988; Reinert, 1990; Carter et al., 1999; Albuquerque & Reinert, 2001; Albuquerque et al., 2001). O acúmulo de pressões provocadas pelo tráfego de máquinas e a acomodação natural de partículas do solo

(Carvalho Jr., 1998) elevam o estado de compactação do solo. Estima-se que no mundo, aproximadamente 68 milhões de hectares estão degradados pela compactação provocada pelo tráfego de máquinas (Flowers & Lal, 1998). Na Austrália, a compactação é a principal causa da degradação do solo em lavouras mecanizadas (Radford et al., 2000; 2001). A maior suscetibilidade do solo à compactação pelo tráfego de máquinas ocorre quando o solo está com 60 % dos poros preenchidos com água (Silva et al., 2002). No sul do Brasil, as operações de colheita das culturas de verão e inverno são realizadas com o solo em condições de alta umidade e, portanto, suscetíveis à compactação.

Dentro de uma mesma gleba, as plantas podem experimentar diferentes condições físicas do solo, devido ao sistema e à intensidade do tráfego das máquinas sobre a lavoura. Mas, pouco se conhece sobre a influência do aumento do estado de compactação na relação com os atributos físicos e hídricos do solo e na relação com o desenvolvimento das plantas.

Os sistemas de cultivo e ou manejo do solo provocam alterações na estrutura do solo, na distribuição e continuidade de poros, distribuição horizontal e vertical de nutrientes e na temperatura do solo. Em um Latossolo Vermelho distroférico típico, localizado no estado de São Paulo, a análise do sistema radicular de soja mostrou que o manejo de solo com grade pesada concentrou 50 % das raízes da soja na camada superficial, 40 % no plantio direto e 30 % no tratamento que recebeu escarificação (De Maria et al., 1999). A compactação do solo provoca redução de produtividade e, principalmente, redução do crescimento das raízes das plantas. Segundo Unger & Kaspar (1994), a compactação do solo reduz o crescimento das plantas quando há redução no suprimento de água, nutrientes e oxigênio para as raízes. Isso é facilmente observado quando as raízes se desenvolvem acima da camada compactada quando as condições climáticas são desfavoráveis.

Em solo compactado, as raízes sofrem modificações morfológicas e fisiológicas, as quais afetam a sua funcionalidade e o desempenho da planta (Alvarenga et al., 1996). Grable (1966) observou que mudanças na morfologia, na hidratação e na taxa de respiração podem estar associadas à habilidade

das raízes em penetrar nos solos compactados. O acúmulo de etileno sob condições de baixa difusão de oxigênio provoca um aumento de raízes laterais e de pêlos radiculares (Taylor & Brar, 1991).

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 experimentam 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 plantio direto apresentou, na profundidade de 0 a 40 cm, menor densidade de raízes (cm de raiz por cm^3 de solo) do que no preparo convencional de solo, enquanto que, na camada de zero a 10 cm, o plantio direto apresentou maior densidade de raízes (Silva et al., 2000c). Estudos sobre os efeitos da compactação do solo medidos diretamente no campo são necessários, porém deve-se realizar o monitoramento da planta durante todo o seu ciclo.

Diversos autores verificaram que a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas situa-se entre 1 MPa e 3,5 MPa (Taylor et al., 1966; Gerard et al., 1982; Sene et al., 1985; Nesmith, 1987; Canarache, et al., 1984; Merotto & Mundstock, 1999). A variação desses valores críticos está associado ao tipo de planta, teor de argila do solo, sistema de condução do experimento e ao sistema de manejo do solo. Contudo, o valor de 2 MPa tem sido, geralmente, utilizado como um valor de resistência à penetração limitante (Hakanson et al., 1988; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998, 1999).

Mesmo com maior umidade do solo no plantio direto, Pikul et al. (1993) verificaram valores de 1 MPa a mais de resistência à penetração no plantio

direto, quando comparado ao preparo convencional. A maior umidade do solo no plantio direto pode ter mascarado as diferenças entre os sistemas de cultivo no trabalho de Pikul et al. (1993). O limite de 2 MPa pode estar relacionado com o crescimento radicular em solos desestruturados, mas em solos estruturados, as raízes exploram áreas de menor resistência à penetração e macroporos, geralmente entre agregados, por isso, conseguem desenvolver-se em solos com alta resistência à penetração (Pikul et al., 1993).

Avaliando o desenvolvimento radicular do milho em um Latossolo Vermelho distroférrico típico no norte do Paraná, cultivado sob plantio direto por 20 anos e sistema convencional por 10 anos, Tavares Filho et al. (2001) verificaram valores de resistência à penetração para o plantio direto de 3,54 MPa e para o preparo convencional de 2,24 MPa nos 15 cm superficiais. Tais valores de resistência à penetração, embora elevados, não foram impeditivos para o crescimento radicular nos dois sistemas de manejo do solo. Os autores verificaram que as raízes apresentam modificações morfológicas, tais como aumento de diâmetro acima da camada compactada e encurvamento para procurar pontos de menor resistência e ultrapassar a camada compactada. No plantio direto, as raízes do milho apresentavam maior quantidade de deformações morfológicas exteriorizadas, tais como o aumento do diâmetro, tortuosidade e poucos pêlos radiculares. Embora houvesse menor resistência à penetração no preparo convencional, esse apresentava uma estrutura maciça, sem fissuras ou poros biológicos e foi mais restritivo do que o plantio direto que apresenta fissuras na estrutura e maior quantidade de poros biológicos. Salih et al. (1998) verificaram que a densidade do solo e a resistência à penetração explicaram 79 % da variação do peso seco de raízes de algodoeiro. Segundo os autores, as raízes cresceram nas rachaduras no solo, diminuindo a relação entre o peso de raízes e os valores de resistência à penetração.

Poros contínuos e de maior diâmetro são importantes para o crescimento de raízes com baixo consumo de energia pela planta. A estrutura do solo influencia o crescimento das plantas de várias formas, sendo o efeito

sobre o alongamento radicular o mais claro e determinante na habilidade das raízes em extrair água e nutrientes do solo em quantidades adequadas. As raízes crescem, preferencialmente, nos macroporos e nas fissuras do solo. Além da resistência à penetração, outros fatores inter-relacionados influenciam no crescimento radicular, tais como a continuidade de poros, a fertilidade, a presença de microrganismos patogênicos ou simbióticos nos macroporos, a oxigenação do solo e a quantidade de água disponível (Passioura, 1991).

Segundo Glinski & Lipiec (1990), o diâmetro médio das raízes principais e laterais de primeira ordem de milho, medem respectivamente, 1037 μm e 314 μm em solos com baixa densidade do solo e 2208 μm e 640 μm em solo severamente compactado. Portanto, as raízes principais e laterais de primeira ordem dificilmente crescem em microporos (diâmetro < 48 μm). As raízes de milho não crescem em poros com diâmetro menor que 138 μm em uma situação de poros rígidos, porém em sistemas de poros não rígidos, podem crescer em poros de 46 μm de diâmetro. Albuquerque & Reinert (2001) não verificaram restrição ao crescimento radicular do milho num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico com densidade do solo variando de 1,39 Mg m^{-3} a 1,71 Mg m^{-3} .

Normalmente, camadas compactadas provocam aumento do diâmetro das raízes acima da camada compactada (Materechera et al., 1992) e diminuição do diâmetro na camada compacta ou proliferação de raízes laterais mais finas (Russel & Gross, 1974). Ainda, a identificação no campo de camadas compactadas é qualitativa, porque não se conhece um valor específico de resistência à penetração crítica para a maioria das culturas e tipos de solos (Vepraskas & Wagger, 1989). Uma primeira aproximação para a definição de limites críticos para identificar camadas e solos compactados aplicados para as condições do sul do Brasil considera como limitante a densidade do solo de 1,45 Mg m^{-3} para solos com mais de 55 % de argila, 1,55 Mg m^{-3} para solos entre 20 e 55 % de argila e, 1,65 Mg m^{-3} para solos com menos de 20 % de argila (Reinert & Reichert, 1999; Reinert et al., 2001)

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. Albuquerque et al. (2001) verificaram que a redução da macroporosidade de um Nitossolo Vermelho refletiu significativamente na porosidade total, a qual foi reduzida de $0,70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na mata, para $0,59 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no preparo convencional de manejo de solo e para $0,56 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no plantio direto.

Camadas compactadas possuem alta resistência à penetração quando o solo está seco e deficiência de oxigênio quando úmido, ocasionada pela alta densidade do solo e pequena macroporosidade. Camadas compactadas provocam dificuldades na semeadura, emergência e maior probabilidade de presença de patógenos beneficiada pela maior umidade (alta microporosidade e lenta infiltração da água).

Água no solo

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 conservação da umidade do solo é uma questão crítica para a produção de grãos, particulamente em climas semi-áridos (Azooz et al., 1996), mas não limitadas a essas áreas.

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 plantio direto, além da palhada na superfície,

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

Nesse sentido, Kertzmann (1996) utilizando cilindros duplos concêntricos, em Latossolo Vermelho Distroférico, encontrou que a taxa constante de infiltração em mata nativa foi de 139 cm h^{-1} e na área com plantio direto, cultivado intensivamente por 15 anos com pouca cobertura morta foi de apenas 6 cm h^{-1} , demonstrando que, apesar de se utilizar o plantio direto, houve uma drástica redução (mais de 20 vezes) da infiltração. Albuquerque et al. (2001) verificaram redução de 38 vezes na K_{sat} nos sistemas plantio direto e convencional comparados com a condição de mata natural, em um Nitossolo Vermelho. Essa redução da K_{sat} foi atribuída à redução da macroporosidade, de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na condição da mata para $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na condição de plantio direto. Barcelos et al. (1999) verificaram maior taxa de infiltração de água no plantio direto, quando comparado ao preparo convencional, em um Latossolo Vermelho distrófico. No preparo convencional, a taxa de infiltração de água no solo foi 18 % inferior ao verificado no plantio direto, tendo como consequência um maior escoamento superficial, aumentando os riscos de perdas de solo e nutrientes por erosão. Estudos conduzidos em solos com diferentes classes texturais e em diferentes climas indicaram que o preparo reduzido (somente grade) aumentou a K_{sat} comparado com o sistema de preparo convencional (uma aração e duas gradagens) (Carter, 1988; Benjamin, 1993).

Mesmo quando a densidade do solo foi maior e a porosidade total menor em solos sob plantio direto comparado com solos revolvidos, a infiltração acumulada de água no solo foi igual ou maior no plantio direto do que em solos

revolvidos (Azooz et al., 1996), o que foi atribuído à estrutura estável no plantio direto e aumento do número de canais biológicos contínuos.

A infiltração e a retenção de água no solo determinam o balanço de água na zona radicular. Por isso, o conhecimento dos processos de infiltração, distribuição e armazenamento de água no solo e suas relações com propriedades do solo são de fundamental importância para o eficiente manejo de solo, água e plantas. A proteção física na superfície do solo proporcionada pela palha no plantio direto refletiu em maior infiltração acumulada e maior taxa constante de infiltração no plantio direto, comparado ao preparo convencional, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, textura superficial franco argilosa (Alves & Cabeda, 1999). Porém, com o aumento do estado de compactação em lavouras sob plantio direto, a maior capacidade de infiltração de água em plantio direto se manterá ao longo dos anos?

A água é a responsável pelas maiores flutuações de produção das culturas. Assim, devemos priorizar práticas de manejo de solo ou manejo de culturas que proporcionam um melhor aproveitamento da água. Tais práticas seriam manter cobertura permanente do solo, terraços de contenção, utilizar plantas com sistema radicular abundante capaz de recuperar a estrutura do solo e descompactá-lo, favorecendo o crescimento das raízes das plantas das próximas safras em profundidade e explorando um maior volume de solo. Albuquerque et al. (2001) avaliando alterações nas propriedades físicas de um Nitossolo Vermelho na região de Lages (SC) verificaram que o plantio direto armazenou $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de água a mais na camada de 0-20 cm quando comparado com o sistema convencional de preparo do solo. Esse maior armazenamento de água no plantio direto está associado a uma menor quantidade de macroporos no plantio direto ($0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) quando comparado ao preparo convencional ($0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Tavares Filho et al. (2001) também verificaram maior umidade do solo no plantio direto ($0,17 \text{ kg kg}^{-1}$) quando comparado com o preparo convencional ($0,15 \text{ kg kg}^{-1}$). Essa maior retenção de água no plantio direto é reflexo da maior capacidade de infiltração de água,

maior retenção provocado pela maior densidade do solo e pela menor evaporação da água do solo para a atmosfera.

O efeito benéfico do maior armazenamento de água no plantio direto é maior em anos com deficiência hídrica. Karunatilake et al. (2000) verificaram maior lâmina de água armazenada no plantio direto do que no preparo convencional em um ano relativamente seco. Este maior armazenamento de água no plantio direto se deve a maior microporosidade e, conseqüentemente, menor macroporosidade no plantio direto comparado ao convencional. Além disso, o plantio direto possuía cobertura do solo de 78 % e no preparo convencional, apenas 17 % de cobertura morta na superfície. Já em ano mais chuvoso, não verificaram diferenças entre os sistemas de cultivo no armazenamento de água. Johnson et al. (1984) relataram que o maior armazenamento de água no plantio direto está relacionado com a maior quantidade de poros que armazenam água em tensões menores que 10 kPa. Em regiões que apresentam pequenos veranicos, a quantidade de água armazenada no solo pode representar a manutenção da produtividade das plantas.

Existe diferença entre água armazenada no solo e água disponível para as plantas. Nem todo o conteúdo de água no solo é disponível para as plantas, pois, no solo, existe uma proporção de poros de pequeno diâmetro que retém a água a tensões superiores à capacidade de extração pelas plantas. Tradicionalmente, tem-se considerado como água disponível à quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade de campo é a quantidade de água retida no solo após drenagem de 24 a 48 horas, depois do solo estar completamente saturado, ou ainda, a quantidade de água retida nos potenciais de $-0,03$ MPa para solos argilosos ou $-0,01$ MPa para solos arenosos, determinada em amostras com estrutura indeformada. O ponto de murcha permanente é a quantidade de água no potencial de $-1,5$ MPa, ou quando as plantas não conseguem recuperar a turgidez, mesmo em ambiente com 100 % de saturação atmosférica (Hillel, 1980).

Por considerar somente parâmetros de solo, esses índices têm sido motivos de várias contestações. Os principais argumentos sugerem que as plantas podem retirar água do solo submetida a potenciais menores que $-1,5$ MPa. Além disso, determinações laboratoriais do PMP e da CC freqüentemente não conferem com valores obtidos no campo. Ratcliff et al. (1983) encontraram que o potencial de $-0,03$ MPa subestima a determinação no campo do limite superior de disponibilidade hídrica em solos arenosos e superestima para solos de textura argilosa ou siltosa. Por outro lado, o potencial de $-1,5$ MPa subestima o PMP, comparado ao limite inferior para solos de textura arenosa e siltosa, e superestima em solos argilosos.

Os parâmetros hídricos do solo, tais como condutividade hidráulica em solo saturado, fluxo em solo não saturado e a curva característica de água no solo, possuem grande importância na prevenção de contaminação de águas superficiais e sub-superficiais.

CAPÍTULO 1. VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO

RESUMO

O estudo da variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RP) é de grande importância no estudo da compactação do solo, principalmente, em lavouras sob plantio direto onde as pressões exercidas pelo tráfego das máquinas acumulam-se anualmente. O objetivo desse estudo foi determinar a variabilidade espacial da RP em lavouras sob plantio direto, identificando diferentes estados de compactação. Determinou-se a RP diretamente no campo, de forma sistemática em três tipos de solos. Na primeira área experimental localizada em Santa Maria, o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, com aproximadamente 120 g kg^{-1} de argila na camada de 0-20 cm. A segunda, localizada no município de Cruz Alta, o solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, apresentando 500 g kg^{-1} de argila na camada de 0-20cm e a terceira área experimental situava-se em Coronel Barros, o solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico, com 600 g kg^{-1} de argila na camada de 0-20cm. Os valores de RP foram analisados por estatísticas descritivas e por técnicas geoestatísticas. No geral, os valores de RP no Argissolo não apresentaram distribuição normal, enquanto que nos Latossolos, a maioria das profundidades apresentou distribuição normal. Os semivariogramas ajustados apresentaram moderada a forte dependência espacial. Nos três solos, utilizou-se a técnica da krigagem para confeccionar mapas de superfície, identificando três classes de RP, a qual, chamamos de estados de compactação (EC). No Argissolo, o menor EC foi considerado os valores de RP entre 0,58 MPa a 0,88 MPa, o intermediário EC entre 0,89 MPa a 1,18 MPa e o maior EC, valores de RP entre 1,19 MPa e 1,50 MPa. No Latossolo Vermelho distrófico, no menor EC foram selecionados os valores de RP variando entre 1,70 MPa a 2,22 MPa, o intermediário EC, RP entre 2,23 MPa a 2,75 MPa e, no maior EC, valores de RP entre 2,76 MPa a

3,20 MPa. No Latossolo Vermelho distroférico típico os valores de RP no menor EC foram entre 0,20 MPa a 1,59 MPa, no intermediário EC entre 1,60 MPa a 2,10 MPa e no maior EC, entre 2,11 MPa a 2,80 MPa. Nas três áreas, a distribuição dos estados de compactação diminuiu da área de cabeceira (maior EC) para o centro da lavoura (menor EC).

INTRODUÇÃO

A compactação afeta a qualidade do solo e a sua avaliação é baseada na condição atual em que se encontra o solo em comparação a uma condição natural ou sem restrições ao crescimento e produtividade das plantas. Diversas propriedades podem ser utilizadas para determinar o estado atual de compactação; geralmente, são utilizadas propriedades do solo relacionadas à relação massa/volume e de resistência que o mesmo oferece à penetração de um objeto metálico, geralmente um cone. A preferência em utilizar penetrógrafos para medir o estado de compactação do solo está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Ainda, os penetrógrafos medem a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade e os valores de resistência à penetração são positivamente correlacionados com a densidade do solo (D_s). Estudando os efeitos do tráfego de máquinas sobre o solo, Voorhees et al. (1978) verificaram que a RP foi mais sensível como indicador da compactação do solo do que a D_s .

A variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversas propriedades do solo, inclusive da RP, é dependente de fatores de formação do solo e fatores relacionados com o manejo do solo (Souza et al., 2001). No plantio direto, a ausência de revolvimento do solo provoca um aumento da D_s (Reinert, 1990; Hakansson & Medvedev, 1995; Kertsmann, 1996; Klein, 1998; Silva et al., 2000a; Silva et al., 2000b) que refletirá em maior RP do solo.

No campo, a RP é bastante variável, sendo muito influenciada pelas condições do manejo dado ao solo e a intensidade de tráfego das máquinas

agrícolas e é dependente da umidade do solo. O tráfego de máquinas agrícolas sobre o solo em condições de menor resistência do solo à deformação ou com umidade excessiva do solo provoca compactação, a qual, geralmente está localizada na profundidade entre 1/3 e 1/5 da largura da área de contato dos pneus com o solo (Hillel, 1980). Anualmente, o acúmulo de pressões provocadas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal sobre o solo, provoca locais de maior estado de compactação dentro da lavoura, principalmente, nas áreas ditas de “cabeceira” onde o tráfego de máquinas é mais intenso.

A geoestatística, ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem. O estudo da variabilidade espacial pode ser realizado em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solos (Berg & Klamt, 1997; Couto et al., 2000) e em áreas menores (Albuquerque et al., 1996; Souza et al., 1998; Oliveira et al., 1999; Abreu, 2000; Dariva, 2001). Além da paisagem, o manejo influencia fortemente a variabilidade de propriedades físicas, tais como a porosidade e a condutividade hidráulica saturada (Slay et al., 1986). Souza et al. (1997) relatam o efeito da variabilidade espacial de outras propriedades físicas (umidade gravimétrica do solo e teor de argila) e químicas (fósforo disponível e potássio) do solo na cultura da laranja.

O estudo da variabilidade espacial de atributos do solo é particularmente importante em áreas sob diferentes manejos (Souza et al., 2001). A análise geoestatística pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade espacial do solo sobre a produção das culturas, como também, para estimar respostas das plantas a determinadas práticas de manejo do solo. A geoestatística possibilita a descrição de uma propriedade do solo considerando a sua posição espacial. A ação do sistema de manejo do solo e o sistema de tráfego não são uniformes em toda a área, por isso, torna-se importante analisar a distribuição espacial dos valores de RP e Ds.

Utset & Cid (2001) encontraram comportamento distintos da variabilidade espacial da RP em condições de solo seco e de solo úmido. Na condição de solo seco, os autores obtiveram coeficiente de variação de 25% e ajustaram semivariograma do tipo esférico, enquanto que, quando úmido, o coeficiente de variação foi de 80 % e os dados apresentaram efeito pepita puro, mostrando o efeito da variabilidade temporal da umidade do solo na variabilidade espacial da resistência à penetração. Gonçalves et al. (1999), estudando a variabilidade temporal da umidade do solo verificaram que essa não se distribuiu de forma aleatória na área, possuindo dependência espacial bem definida no horizonte A de um Argissolo Vermelho (Podzólico Vermelho-Escuro).

O efeito de camadas de maior estado de compactação na variabilidade espacial da resistência à penetração foi verificado por Abreu (2000), num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, cultivado com plantio direto. A camada de 7,5 cm até 17,5 cm possuía um maior estado de compactação e ausência de dependência espacial nessa camada, porém ocorreu dependência espacial nas profundidades de 2,5 cm e de 5 cm com ajuste de modelos exponencial e na profundidade de 30 cm ajustando modelo esférico.

A distribuição da compactação do solo em áreas sob plantio direto ocorre de maneira sistemática, sendo maior nas laterais da lavoura e diminuindo para o centro da lavoura. O objetivo deste estudo foi verificar a variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em lavouras sob plantio direto, procurando identificar estados de compactação em função do tráfego das máquinas sobre o solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo, utilizaram-se três tipos de solos que ocorrem no Rio Grande do Sul e a distribuição e o agrupamento dos valores de resistência mecânica à penetração (RP) foi a base para a identificação das três áreas experimentais que serão estudadas nos capítulos 2, 3 e 4.

A primeira localiza-se na área experimental do Departamento de Solos, UFSM, no município de Santa Maria, RS, latitude de 29° 41' Sul, longitude de 53°48' Oeste e altitude de 95 metros. O clima da região é classificado como "Cfa" de Köppen, ou seja, 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-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 1999). O manejo da área experimental consistia em semeadura direta por aproximadamente 10 anos, cultivando soja ou milho no verão e trigo ou aveia durante o inverno.

A segunda área experimental estava localizada na propriedade do Sr. Ulfried Arns, no município de Cruz Alta, RS, latitude 28° 38' Sul, longitude 53° 36' Oeste e altitude de 494 metros. O clima da região enquadra-se na classificação "Cfalg²" de Köpen, ou seja, subtropical úmido, sem estiagem típica. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C e do mês mais frio é superior a 3 °C e inferior a 18 °C. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 1999), sendo que a área experimental era cultivada sob plantio direto por aproximadamente 14 anos, com culturas de soja e milho, no verão, aveia+ervilhaca e trigo, no inverno. O esquema de sucessão de culturas prevê que 50 % da área cultivada no verão é destinada com a cultura da soja e 50% com milho e da mesma forma no inverno.

A terceira, em área localizada na propriedade do Sr. Arnaldo Yank, no município de Coronel Barros, RS, latitude 28° 22' Sul, longitude 54° 04' Oeste e altitude de 298 metros,. O clima da região também se enquadra na classificação "Cfalg²" de Köpen. O solo da área experimental é classificado como um Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 1999), cultivado sob plantio direto por aproximadamente 7 anos, com soja no verão e aveia ou trigo no inverno.

Foram realizadas determinações de resistência mecânica do solo à penetração (RP) em distâncias pré-definidas, utilizando penetrógrafo manual, com armazenamento eletrônico de dados (RIMIK, CP 20), para o Argissolo

Vermelho-Amarelo distrófico, e um penetrógrafo de molas (SOILCONTROL®-PENETROGRAPHER SC-60), para os Latossolos. Ambos penetrógrafos possuem cone com base de 12,83 mm de diâmetro e ângulo de 30°.

Na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, Santa Maria, RS, determinou-se a RP a cada três metros no sentido norte-sul e a cada quatro metros no sentido leste-oeste, totalizando uma área de 450 m² (Figura 1). Nos Latossolos, determinou-se a RP em uma área de 50x30 metros a cada dois metros no sentido norte-sul e a cada cinco metros no sentido leste-oeste, totalizando 195 pontos para cada local (Figuras 2). Nos três locais foram coletadas amostras para determinação da umidade gravimétrica do solo.

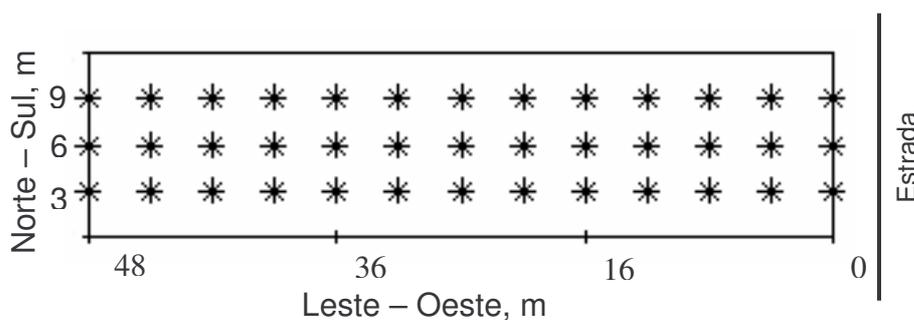


FIGURA 1. Croqui dos pontos amostrados no Argissolo Vermelho-Amarelo em Santa Maria, RS. Asteriscos indicam os pontos amostrados.

Os valores de RP foram analisados por estatísticas descritivas, tais como: média aritmética, mediana, moda, coeficiente de variação, desvio padrão, coeficientes de assimetria e de curtose, bem como o teste W (Kolmogorov) (Snedecor & Cochran, 1974).

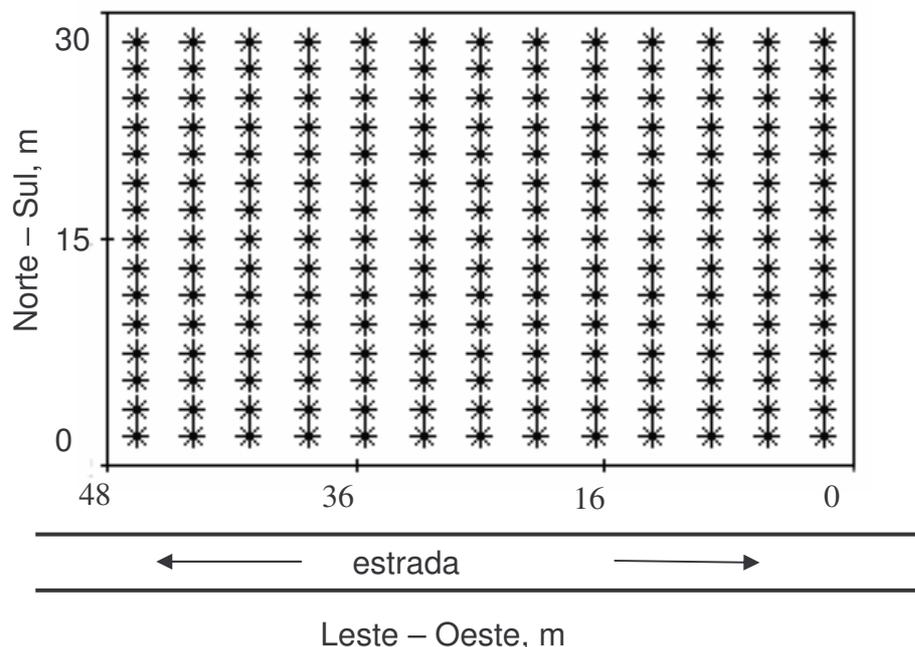


FIGURA 2. Croqui dos pontos amostrados das áreas no Latossolo Vermelho distrófico em Cruz Alta, RS e no Latossolo Vermelho distroférico típico, em Coronel Barros. Asteriscos indicam os pontos amostrados.

O ajuste de semivariogramas foi realizado pelo software GS⁺ (Gamma Design Software, 1998), testando semivariogramas do tipo esférico, exponencial, linear e gaussiano. A escolha do modelo foi realizada observando-se o melhor coeficiente de correlação obtido pela técnica chamada de validação cruzada. Essa técnica consiste em retirar, individualmente, cada ponto medido da área estudada e o seu valor é estimado pelo modelo como se ele nunca existisse.

O semivariograma é um gráfico que relaciona a semivariância de uma variável qualquer com uma distância (h). Os semivariogramas apresentam três importantes parâmetros: i) o efeito pepita (C_0), que se refere ao valor da semivariância para a distância zero e representa o componente da variação ao acaso; ii) o patamar ($C_0 + C_1$), que é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante (é o máximo da semivariância). O patamar é atingido quando a variância dos dados se torna constante com as distâncias entre as amostras e esse parâmetro permite a determinação da distância limite

entre a dependência e a independência entre as amostras. iii) o alcance (a) é à distância da origem até onde o patamar atinge valor estável, considerado o limite da dependência espacial da grandeza medida.

Após escolher o semivariograma de melhor ajuste à variável, realizou-se a krigagem dos dados. A krigagem estima valores entre os pontos observados considerando os parâmetros do semivariograma, sendo muito útil para confeccionar mapas de superfície com maior precisão.

Para analisar o grau de dependência espacial foi realizado uma modificação da classificação de Cambardella et al. (1994), subtraindo uma unidade do resultado da divisão entre C_0 e $(C_0 + C_1)$. Nesse caso, são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita $> 0,75$ do patamar, de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre $0,75$ e $0,25$ do patamar e de fraca dependência quando o efeito pepita é $< 0,25$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de umidade gravimétrica do solo no momento da determinação da RP encontram-se nos Anexos A, B e C. Para o Argissolo, os valores de RP na profundidade de 5 cm, 10 cm e 20 cm apresentaram distribuição normal dos dados (Tabela 1). Nas demais profundidades, a RP não apresentou distribuição normal, conforme o teste W. No Latossolo Vermelho distrófico, a maioria das profundidades apresentou distribuição normal, com exceção das profundidades de 7,5 cm e 25 cm. No Latossolo Vermelho Distroférrico de Coronel Barros, todas as profundidades apresentaram distribuição normal dos valores de RP. Esses resultados concordam com aqueles encontrados por Utset & Cid (2001), que verificaram distribuição normal para a RP num Latossolo.

Abreu (2000), trabalhando num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, verificou distribuição normal para a RP nas profundidades de 5 cm, 7,5 cm, 10 cm e 15 cm e distribuição não normal para as profundidades de 2,5 cm,

12,5 cm, 17 cm e 30 cm. Dariva (2001) verificou distribuição diferente da normal nos valores de RP em 14 profundidades das 16 profundidades estudadas, em um Planossolo em Santa Maria, RS.

TABELA 1. Valores de média, mediana (Med), moda (Mo), amplitude (Ampl), coeficiente de variação (CV em %), assimetria (Ass), curtose (Curt) e teste de Kolmorow (W) para a resistência à penetração (MPa) em diferentes profundidades nas três classes de solos sob plantio direto.

Profundidade	Média	Med	Mo	Ampl.	C.V.	Ass	Curt	W
-----Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico-----								
RP 5 cm	0,99	1,09	0,51	1,61	44,0	0,053	-1,035	0,939*
RP 7,5 cm	1,52	1,51	0,56	2,11	36,5	-0,260	-0,636	0,965 ^{ns}
RP 10 cm	1,84	1,98	1,82	1,89	24,9	-1,058	0,963	0,911*
RP 12,5 cm	1,88	1,94	1,32	1,81	21,8	-0,287	-0,271	0,976 ^{ns}
RP 15 cm	1,77	1,79	1,33	1,12	17,5	0,100	-1,024	0,956 ^{ns}
RP 17,5 cm	1,65	1,63	1,67	1,22	17,5	0,668	0,299	0,949 ^{ns}
RP 20 cm	1,62	1,58	1,18	1,28	18,5	0,921	0,896	0,926*
RP 22,5 cm	1,51	1,49	1,27	1,15	16,9	0,410	0,167	0,973 ^{ns}
RP 25 cm	1,42	1,42	1,42	0,79	14,9	-0,104	-0,642	0,967 ^{ns}
-----Latossolo Vermelho distrófico-----								
RP 5 cm	2,48	2,40	2,10	3,92	31,5	0,528	0,425	0,971*
RP 7,5 cm	2,48	2,40	2,10	3,28	27,8	0,356	-0,010	0,968 ^{ns}
RP 10 cm	2,19	2,10	2,10	3,55	32,0	0,830	1,208	0,954*
RP 12,5 cm	1,96	1,80	1,80	3,55	31,5	0,70	0,491	0,955*
RP 15 cm	1,79	1,80	1,50	2,70	35,1	0,48	-0,175	0,953*
RP 17,5 cm	1,65	1,65	1,80	2,36	19,2	0,364	-0,124	0,963*
RP 20 cm	1,56	1,50	1,50	1,97	27,3	0,355	-0,149	0,961*
RP 22,5 cm	1,54	1,50	1,50	2,10	25,2	0,298	0,196	0,971*
RP 25 cm	1,51	1,50	1,36	1,57	23,6	0,354	0,679	0,978 ^{ns}
-----Latossolo Vermelho distroférico típico-----								
RP 5 cm	1,67	1,64	1,10	4,03	39,6	0,841	0,822	0,945*
RP 7,5 cm	1,82	1,80	1,65	3,61	32,6	0,659	0,611	0,963*
RP 10 cm	1,83	1,80	1,50	2,83	29,2	0,567	0,104	0,957*
RP 12,5 cm	1,73	1,65	1,36	3,16	29,8	0,734	0,741	0,955*
RP 15 cm	1,53	1,50	1,50	2,36	28,1	0,782	0,519	0,941*
RP 17,5 cm	1,35	1,10	1,10	1,81	24,9	0,347	-0,145	0,961*
RP 20 cm	1,29	1,23	1,10	1,51	23,7	0,593	0,786	0,952*
RP 22,5 cm	1,29	1,23	1,10	1,66	23,5	0,388	0,278	0,961*
RP 25 cm	1,29	1,23	1,10	1,78	24,2	0,256	0,095	0,971*

^{ns} = não significativos a 5 % de probabilidade. * significativo, apresentando distribuição normal.

Os atributos do solo apresentam diversas formas de distribuição de dados, dependendo do material de origem, do manejo e das características da

própria variável. Souza et al. (1998) verificou distribuição log-normal para as variáveis fósforo e potássio, distribuição normal para as variáveis; matéria orgânica, umidade do solo e teor de argila. Nielsen et al. (1973) verificaram distribuição normal para a areia, argila e umidade do solo e muito irregular (diferente da normal) para o teor de silte no solo. Diferenças no tipo de distribuição de frequência de dados para o mesmo atributo do solo é oriundo de diferenças no nível e na forma da variabilidade (Souza et al., 2001)

Em todas as profundidades, o coeficiente de variação (CV) da RP variou de 15 % a 44 % no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, semelhantes aos encontrados por Abreu (2000) nesse mesmo tipo de solo. No Latossolo Vermelho distrófico, o CV variou entre 19 % a 35 % e, no Latossolo Vermelho distroférico típico, o CV variou entre 23 % a 40 %. Segundo Warrick & Nielsen (1980), esses valores de CV são considerados médios para variáveis de solo.

O ajuste de semivariogramas nos valores de RP permite verificar a presença ou não de dependência espacial. No Argissolo, nas profundidades de 5 cm, 7,5 cm, 10 cm e 15 cm, ajustaram-se semivariogramas tipo Gaussiano (Figura 3). Nas demais profundidades ajustaram-se o modelo exponencial. Nas profundidades de 5 cm, 7,5 cm e 10 cm os semivariogramas não apresentaram estacionaridade, ou seja, o tamanho da área amostrada não foi suficiente para expressar toda a variabilidade dos valores de RP. Na superfície e até a profundidade de 12 cm, o solo sofre os maiores efeitos do tráfego de máquinas, da atividade biológica e de ciclos de umedecimento e secagem que provocam grande variabilidade e dispersão dos valores de RP. Os semivariogramas ajustados para as profundidades de 12,5 cm até 25 cm apresentaram estacionaridade e alcance em torno de 3 metros.

No Argissolo, apenas nas profundidades de 7,5 cm e de 10 cm, os modelos ajustados apresentaram moderada dependência espacial, conforme classificação adaptada de Cambardella et al. (1994). Nas demais profundidades, os modelos ajustados apresentaram forte dependência espacial, indicando bom ajuste dos semivariogramas aos dados amostrados (Tabela 2).

Abreu (2000) observou que a RP apresentou ausência total de dependência espacial na camada de maior estado de compactação, que se estendia da profundidade de 7,5 cm a 17,5 cm, enquanto que, na profundidade de 2,5 cm, 5 cm e 30 cm, os valores de RP apresentaram dependência espacial e ajustou-se o modelo exponencial e modelo esférico para a RP na profundidade de 30 cm, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

TABELA 2. Estimativa dos parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A) e relação efeito pepita/patamar ($1-(C_0/C_0+C_1)$) para os modelos ajustados aos semivariogramas, para os três tipos de solos analisados.

Variável	C_0	C_0+C_1	A(m)	$1-(C_0/C_0+C_1)$	r^2	VC ¹
-----Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico-----						
RP 5 cm	0,137	0,843	67,6	0,837	0,959	0,408
RP 7,5 cm	0,219	0,746	45,4	0,706	0,939	0,516
RP 10 cm	0,166	0,457	52,4	0,636	0,696	0,448
RP 12,5 cm	0,021	0,194	2,43	0,891	0,449	0,412
RP 15 cm	0,021	0,104	3,98	0,794	0,144	0,281
RP 17,5 cm	0,007	0,080	2,21	0,917	0,215	0,274
RP 20 cm	0,009	0,089	2,86	0,898	0,619	0,276
RP 25 cm	0,005	0,044	2,60	0,896	0,674	0,189
-----Latossolo Vermelho distrófico-----						
RP 5 cm	0,351	0,732	23,8	0,520	0,937	0,686
RP 7,5 cm	0,284	0,568	20,6	0,501	0,997	0,557
RP 10 cm	0,198	0,599	18,7	0,669	0,989	0,552
RP 12,5 cm	0,250	0,501	23,3	0,501	0,971	0,503
RP 15 cm	0,218	0,447	25,2	0,513	0,970	0,460
RP 17,5 cm	0,115	0,242	13,8	0,525	0,937	0,391
RP 20 cm	0,101	0,203	13,6	0,502	0,786	0,366
RP 25 cm	0,065	0,131	13,6	0,504	0,897	0,313
-----Latossolo Vermelho Distroférico típico-----						
RP 5 cm	0,119	0,545	12,9	0,782	0,920	0,505
RP 7,5 cm	0,199	0,423	17,0	0,528	0,932	0,482
RP 10 cm	0,169	0,341	17,2	0,501	0,901	0,480
RP 12,5 cm	0,196	---- ²	----	0,442	0,891	0,489
RP 15 cm	0,138	----	----	0,425	0,961	0,412
RP 17,5 cm	0,089	0,179	41,1	0,503	0,966	0,322
RP 20 cm	0,062	----	----	0,423	0,883	0,275
RP 25 cm	0,086	----	----	0,215	0,841	0,311

¹-Validação Cruzada. ² não existe para esse tipo de semivariograma ajustado.

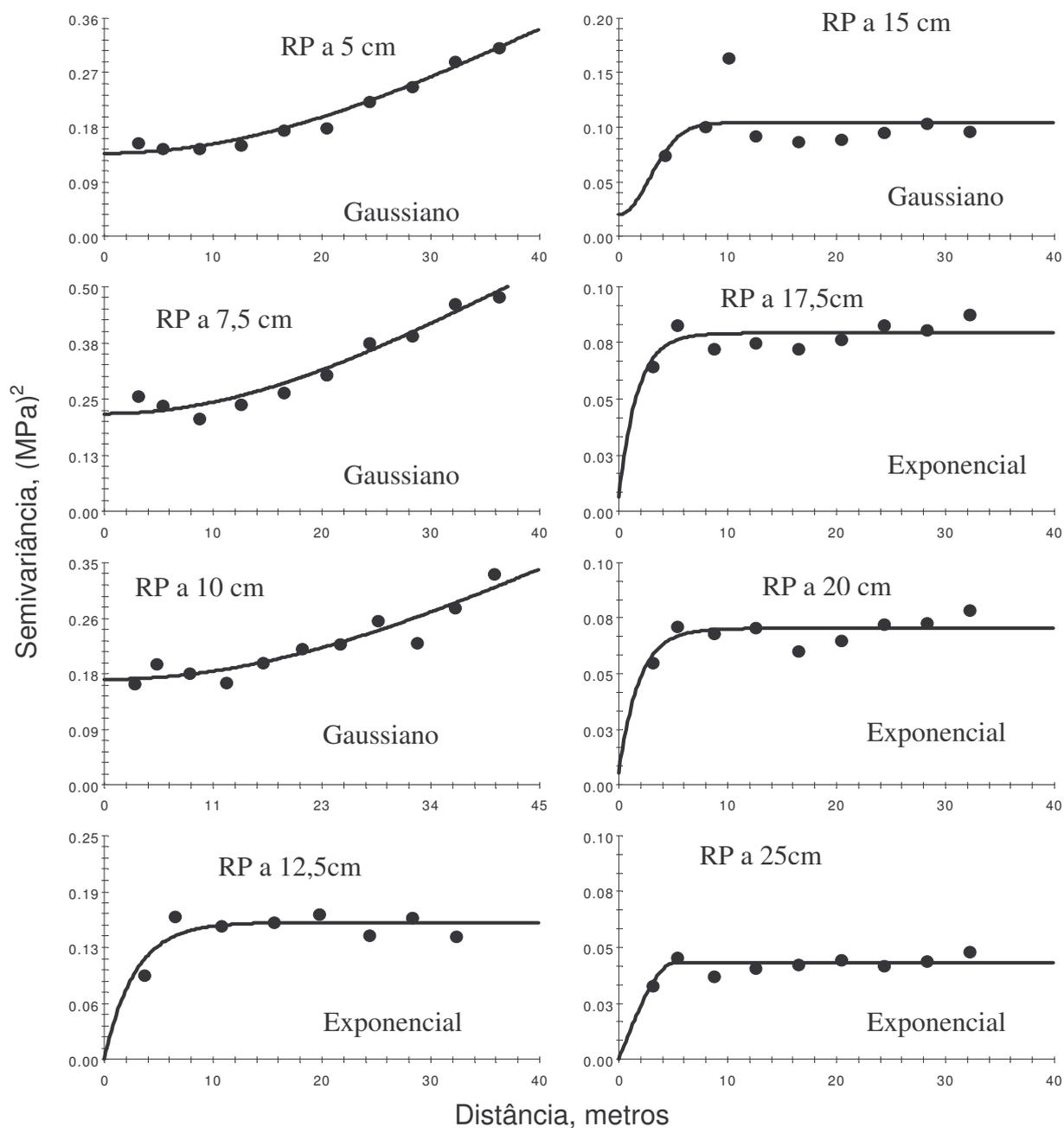


FIGURA 3. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP) em várias profundidades em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico.

Os semivariogramas ajustados para o Latossolo Vermelho distrófico foram do tipo exponencial para as profundidades de 5 cm, 10 cm, 17,5 cm, 20

cm e 25 cm, e do tipo Gaussiano para as profundidades de 7,5 cm, 12,5 cm e 15 cm (Figura 4). Neste tipo de solo, os semivariogramas para todas as profundidades não apresentaram estacionaridade, principalmente, os semivariogramas de RP nas profundidades de 5 cm até 15 cm. Desta forma, os valores do alcance da dependência espacial foram elevados. Nas profundidades de 5 cm até 15 cm, os semivariogramas apresentaram alcance entre 18,7 a 25,2 metros (Tabela 2). Nas profundidades de 17,5 cm, 20 cm e 25 cm, o alcance da dependência espacial foi de aproximadamente 13,6 metros. Para esse tipo de solo e nessa condição de manejo, os modelos apresentaram moderada dependência espacial, em torno de 0,5 (Tabela 2). Apesar de apresentarem moderada dependência espacial, o coeficiente de determinação (r^2) da relação entre a semivariância e o modelo ajustado foi superior a 0,8, com exceção na profundidade de 20 cm que o r^2 foi de 0,78.

No Latossolo Vermelho distroférico, os semivariogramas ajustados foram do tipo exponencial na profundidade de 5 cm, tipo gaussiano nas profundidades de 7,5 cm; 10 cm e 17,5 cm (Figura 5). Nas profundidades de 12,5 cm, 15 cm, 20 cm e 25 cm, os dados de RP apresentaram um comportamento crescente com a distância, ajustando-se então, semivariograma do tipo linear. Na profundidade de 5 cm, o alcance da dependência espacial foi de aproximadamente 13 metros, já nas profundidades de 5 cm, 7,5 cm e 10 cm, os valores de alcance ficaram em torno de 17 metros. O modelo linear caracteriza-se por não apresentar alcance. Na profundidade de 5 cm, o semivariograma apresentou forte dependência espacial (Tabela 2). Na profundidade de 25 cm, o semivariograma apresentou fraca dependência espacial, enquanto que, as demais profundidades apresentaram moderada dependência espacial.

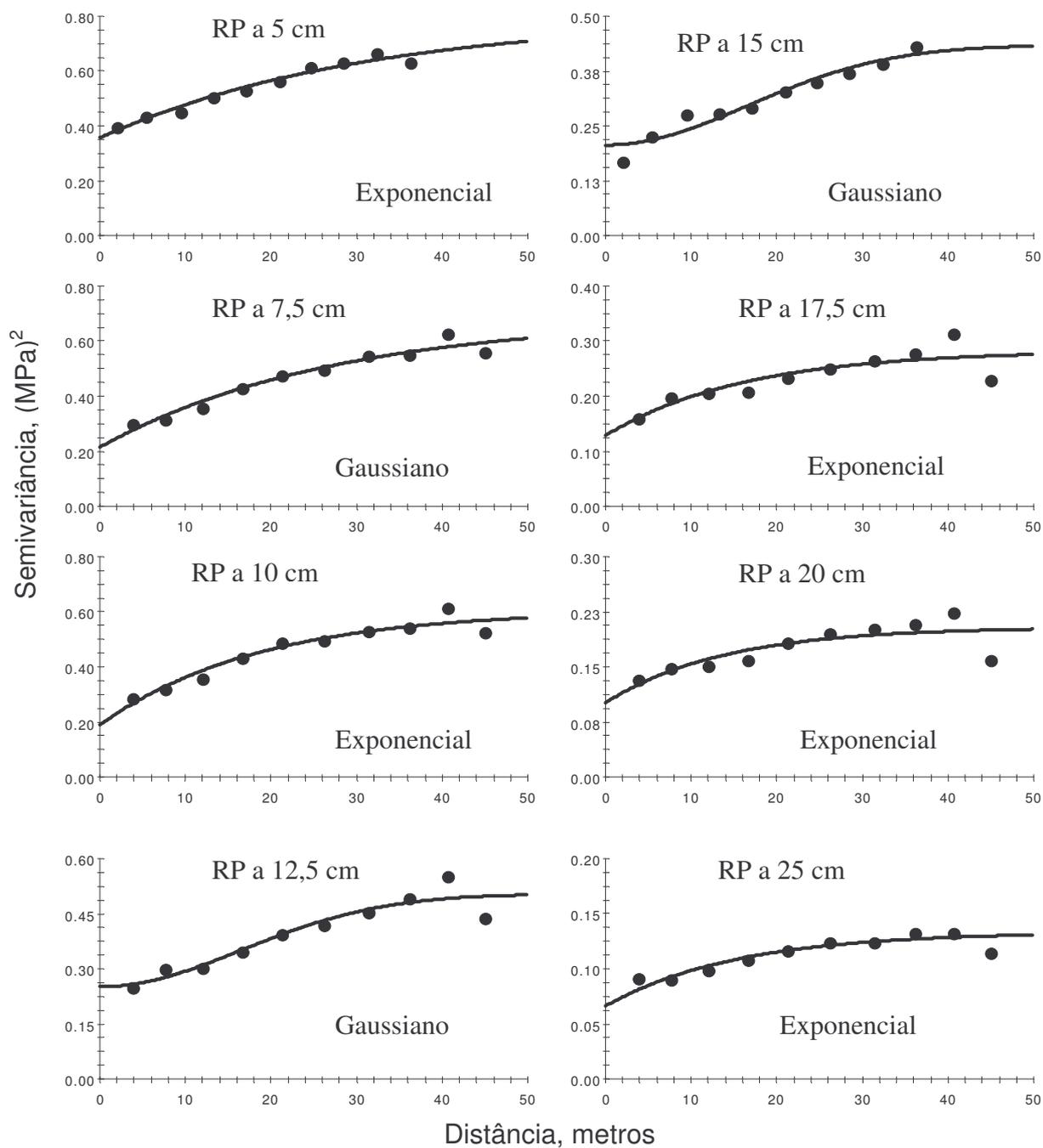


FIGURA 4. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP) em várias profundidades em um Latossolo Vermelho distrófico.

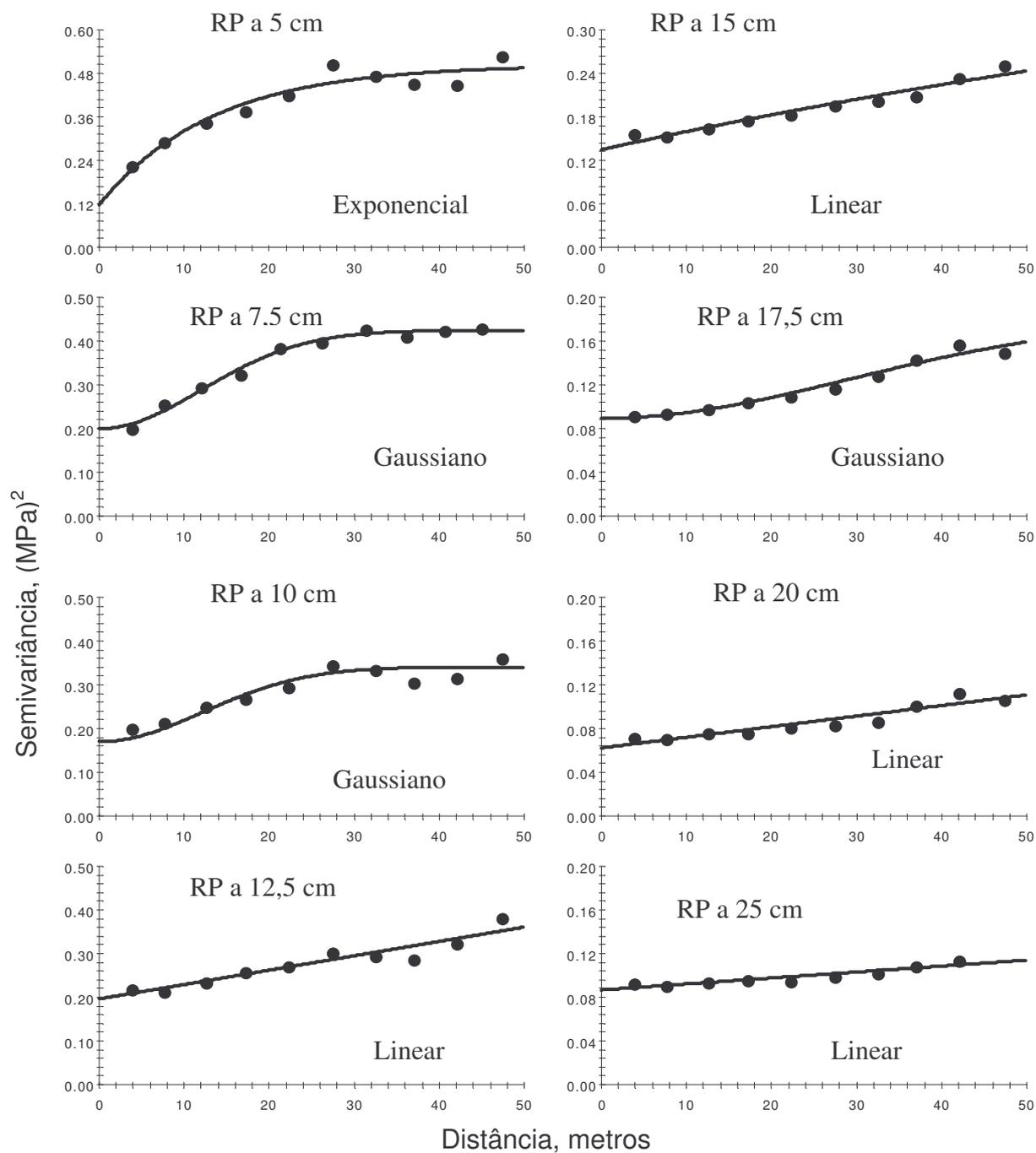


FIGURA 5. Semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração (RP) em várias profundidades em um Latossolo Vermelho distrófico típico.

Souza et al. (2001), analisando a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria

(MS), ajustaram semivariograma do tipo esférico para a RP na profundidade de 0-5 cm, com alcance de 41,6 m e modelo exponencial na profundidade de 15-20 cm, com alcance de 58,8 m, ambos apresentando moderada dependência espacial.

Para visualizar a distribuição dos valores de RP nos locais estudados, realizou-se a krigagem dos dados e gerando mapas de superfície. No Argissolo, o maior estado de compactação (EC) estendeu-se da entrada da lavoura, com RP variando de 1,19 até 1,50 MPa, até aproximadamente os 12 metros iniciais (Figura 6). Na seqüência, o estado de compactação intermediário foi considerado a RP variando de 0,89 a 1,18 MPa e estendeu-se dos 12 metros até próximo dos 24 metros para o interior da lavoura e o menor estado de compactação foi entre 24 metros e 36 metros aproximadamente, com RP variando entre 0,58 a 0,88 MPa.

Para o Latossolo Vermelho distrófico, os mapas de superfície indicaram que o maior estado de compactação variou de 2,76 até 3,20 MPa (Figura 7). O intermediário estado de compactação variou de 2,23 até 2,75 MPa, e o menor estado de compactação foi de 1,70 até 2,22 MPa.

Assim como no Argissolo, o Latossolo Vermelho distroférico típico apresentou uma distribuição da RP em faixas, saindo de um estado de maior compactação na cabeceira da lavoura e diminuindo para o centro da lavoura (Figura 8). O maior estado de compactação apresentou valores de RP variando de 2,11 a 2,80 MPa, para o intermediário estado de compactação considerou-se a RP variando de 1,60 a 2,10 MPa e o menor estado de compactação, 0,20 a 1,59 MPa.

De acordo com os resultados dos mapas de RP, estimados pela krigagem, aceita-se a hipótese que o tráfego de máquinas, principalmente em lavouras sob plantio direto, provoca diferentes estados de compactação do solo e que, o maior estado de compactação ocorre na extremidade da lavoura.

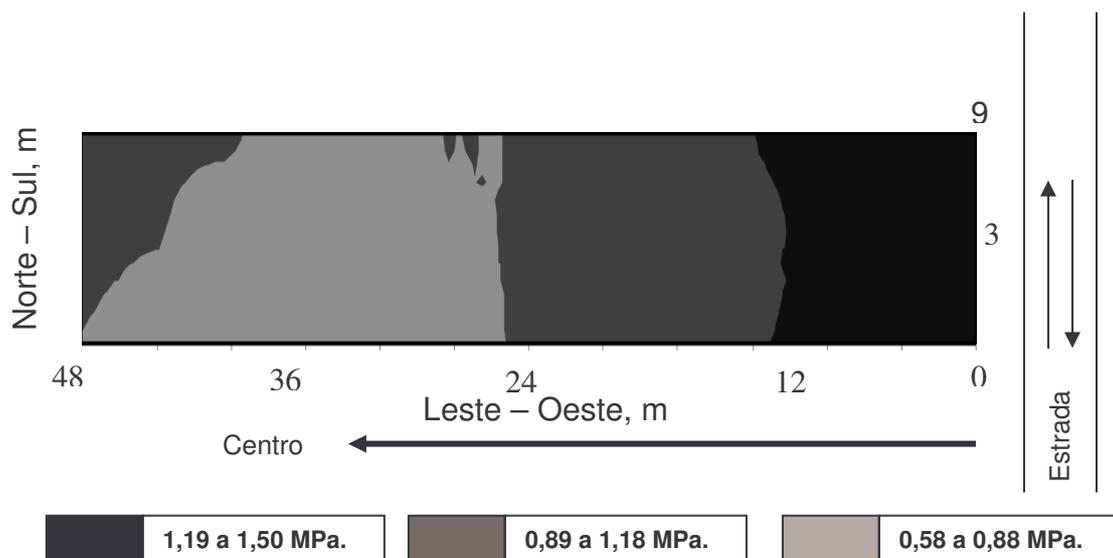


FIGURA 6. Superfície de resistência do solo à penetração na profundidade de 7,5 cm, no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, identificando os estados de compactação.

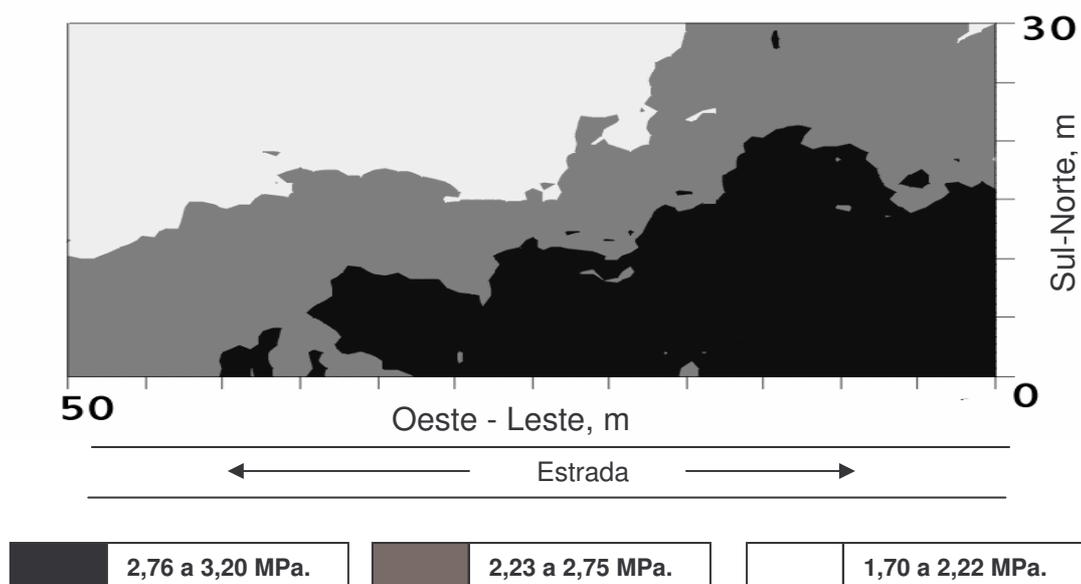


FIGURA 7. Superfície de resistência do solo à penetração na profundidade de 7,5 cm, no Latossolo Vermelho distrófico, identificando os estados de compactação.

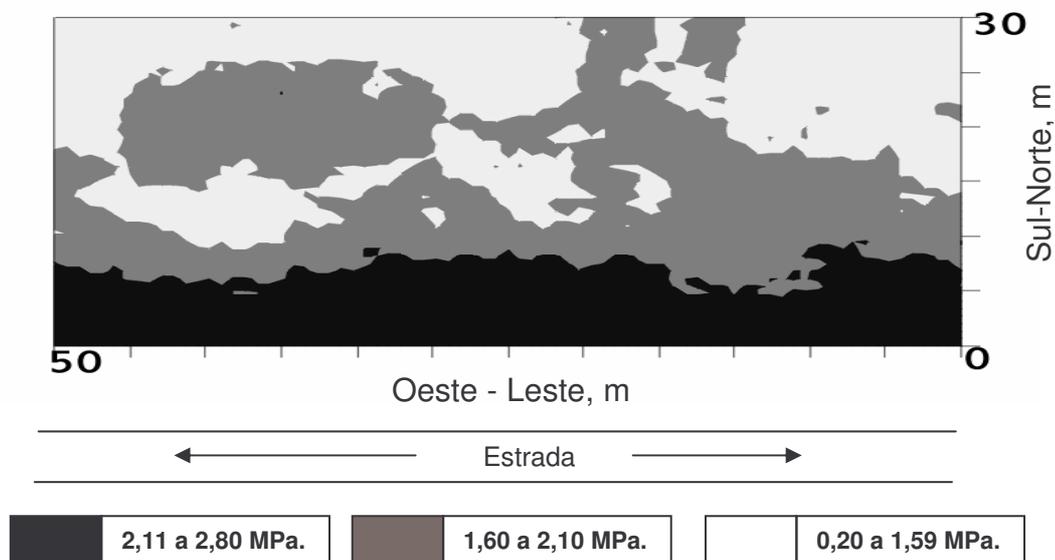


FIGURA 8. Superfície de resistência do solo à penetração na profundidade de 7,5 cm, no Latossolo Vermelho distroférico típico, identificando os estados de compactação.

CONCLUSÕES

A normalidade dos valores de resistência mecânica à penetração é variável para tipos de solos e profundidades, geralmente, nas camadas superficiais e àquelas que recebem o efeito do tráfego de máquinas apresentam distribuição aleatória, diferente da normal.

Nos semivariogramas que apresentaram estacionaridade definida, o alcance foi de aproximadamente 3 metros no Argissolo Vermelho-Amarelo, 13,6 metros no Latossolo Vermelho distrófico e 17 metros no Latossolo Vermelho distroférico típico.

Em lavouras sob plantio direto o tráfego de máquinas provoca distintos estados de compactação. O maior estado de compactação ocorre na região dita “cabeceira” da lavoura, onde as máquinas realizam as manobras e o estado de compactação vai reduzindo-se para o centro da lavoura.

CAPÍTULO 2. INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE TRÊS CLASSES DE SOLOS EM PLANTIO DIRETO.

RESUMO

O intervalo hídrico ótimo (IHO) tem sido utilizado como indicador de qualidade física do solo, pois incorpora determinações de resistência do solo à penetração de raízes, densidade e umidade do solo. A destruição da estrutura, o aumento da densidade do solo, da resistência à penetração e a diminuição da macroporosidade diminuem o IHO. Este estudo objetivou determinar o IHO em três tipos de solos do RS, com diferentes estados de compactação, cultivados sob plantio direto. Coletaram-se amostras com estrutura preservada de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, de um Latossolo Vermelho distrófico e de um Latossolo Vermelho distroférico típico com, respectivamente, 120 g kg⁻¹; 500 g kg⁻¹ e 600 g kg⁻¹ de argila na camada superficial. As áreas experimentais possuíam diferentes estados de compactação provocados pelo tráfego de máquinas. A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com penetrógrafo eletrônico, a velocidade de penetração foi constante de 1 cm min⁻¹, e o cone possuía diâmetro de 4 mm e ângulo de 30°. Realizaram-se simulações de cálculo do IHO alterando os índices de resistência do solo à penetração de raízes. Considerando os limites críticos de RP de 2 MPa e porosidade de aeração crítica de 10 %, a densidade do solo na qual o IHO é zero foi de 1,80 Mg m⁻³ para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, de 1,43 Mg m⁻³ para o Latossolo Vermelho distrófico e de 1,40 Mg m⁻³ para o Latossolo Vermelho distroférico. Em RP de 1 MPa, a densidade do solo onde o IHO é zero foi de 1,60 Mg m⁻³ no Argissolo, 1,30 Mg m⁻³ no Latossolo Vermelho distrófico e 1,28 Mg m⁻³ no Latossolo Vermelho distroférico típico. Na situação de plantas mais resistentes à compactação, RP de 3 MPa, a densidade onde o IHO é zero foi de 1,90 Mg m⁻³ no Argissolo, 1,5 Mg m⁻³ no Latossolo Vermelho distrófico e 1,44 no Latossolo Vermelho distroférico típico.

INTRODUÇÃO

Um solo ideal para a agricultura é aquele que proporciona adequado desenvolvimento e permita maximizar o potencial de produção de uma determinada espécie. Portanto, o solo ideal pode variar para cada cultura e para cada sistema de exploração agrícola. Contudo, de modo geral, deve ser bem drenado, possuir um volume adequado de diferentes diâmetros de poros, alguns responsáveis pela rápida infiltração de água e outros pelo armazenamento da mesma, ter boa fertilidade natural, não possuir elementos químicos em proporções que causem toxidez e não ser severamente ácido ou alcalino. O solo não deverá oferecer resistência ao crescimento radicular, mas ao mesmo tempo, possuir uma estrutura que suporte os efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem e ao impacto do pisoteio de animais e as pressões exercidas pelos rodados das máquinas.

Em estudos de qualidade do solo, buscam-se indicadores de qualidade que descrevam as interações entre os atributos físicos e o crescimento das plantas. Um indicador adequado de qualidade do solo deveria integrar os principais fatores de crescimento das plantas, ser de fácil medição ou estimação e permitir a comparação de diferentes solos, regiões ou sistemas de cultivo, facilitando a identificação, avaliação e monitoramento das práticas de manejo do solo, a fim de aumentar o limite superior e o limite inferior do conteúdo de água no solo onde os fatores físicos diretamente relacionados com o crescimento de plantas são nulos.

Um atributo indicador da qualidade do solo deve ser sensível às variações do manejo ao qual está sendo submetido e que seja possível realizar comparações temporais e entre diferentes tipos de solos e de plantas (Doran & Parkin, 1994). A densidade do solo está relacionada com a resistência do solo à penetração e a estrutura do solo, ambas, afetam o crescimento radicular e é difícil isolar qual delas está influenciado a alongação radicular (Vepraskas & Wagger, 1989).

A resposta das plantas às propriedades físicas dos solos é bastante variável, em função do tipo e manejo de solo, espécie e estágio de desenvolvimento da planta e condições climáticas. Geralmente, experimentos que avaliam o efeito de diferentes manejos do solo, efeito de sistemas de rotações de culturas ou a qualidade física do solo determinam parâmetros de estabilidade e distribuição do diâmetro médio de agregados, densidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes, porosidade total, macro e micro porosidade, entre outros. Porém, são medidos e discutidos de forma isolada, o que muitas vezes, não contribui para o esclarecimento da resposta das plantas ao manejo dado ao solo (Forsythe, 1967; Letey, 1985). As diferentes respostas das plantas à compactação dependem da interação entre a planta, tipo de solo, condições de umidade e estado de compactação (Lipiec & Simota, 1994). Nessa interação, o conteúdo de água no solo é o principal fator.

Nesse sentido, Letey (1985) apresentou o conceito de faixa de umidade não limitante-FUNL (“NLWR - non limiting water range”). Sendo definido como uma faixa de conteúdos de água no solo em que não há restrições ao crescimento das plantas pela deficiência de oxigênio (limite superior) e pela diminuição do conteúdo de água no solo a valores próximos ao ponto de murcha permanente, ou quando a resistência do solo ao crescimento radicular atinge 2 MPa (limite inferior). Silva et al. (1994) aprimoraram o conceito de NLWR, baseado que o crescimento do sistema radicular varia de uma forma contínua com o potencial hídrico, denominando-o como faixa de umidade do solo menos limitante (“LLWR - least limiting water range”). Mais tarde, Orellana et al. (1997) utilizaram o conceito introduzido por Letey (1985) em avaliações da qualidade física do solo, denominando-o de intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo e essa nomenclatura tem sido utilizada no Brasil (Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2000). O LLWR ou o IHO integra três fatores (resistência à penetração, densidade do solo e umidade do solo) relacionados com o crescimento das plantas e determinado pelas propriedades intrínsecas e pela estrutura do solo (Silva et al., 1994). Tormena et al. (1998) encontraram que o IHO relacionou-se positivamente até a densidade de $1,1 \text{ Mg m}^{-3}$ e

negativamente para densidades superiores. Os autores ainda verificaram maior IHO no preparo convencional do que no plantio direto e que a umidade do solo quando a resistência à penetração alcançou 2 MPa foi o limite inferior em 89 % das amostras no plantio direto e 46 % no preparo convencional, indicando maior resistência à penetração no plantio direto para um mesmo valor de densidade do solo. Silva & Kay (1997) encontraram uma redução do IHO com o aumento da densidade do solo e Silva & Kay (1996) verificaram que o crescimento de milho foi correlacionado positivamente com o IHO e negativamente com a freqüência de dias que o conteúdo de água no solo ficou fora dos limites do IHO.

A resistência do solo do solo à penetração de raízes e a densidade do solo estão relacionadas com o estado de compactação do solo e muitos pesquisadores tentaram identificar valores de densidade do solo que provocam restrições ao crescimento das raízes das plantas e diminuição de produtividade. Porém, em virtude da dificuldade de isolar esses parâmetros físicos do solo e, ainda, isolar o efeito da umidade do solo, dúvidas ainda permanecem em identificar qual propriedade do solo melhor caracteriza o estado de compactação e que essa, seja sensível a variações de manejo do solo.

Os atributos físicos do solo são dependentes do teor de argila, prejudicando a comparação entre tipos de solos. Gerard et al. (1982) afirmaram que o valor da resistência à penetração considerado crítico ao crescimento das raízes diminui com o aumento no teor de argila do solo, da mesma forma para a densidade do solo.

Uma das razões da dificuldade de obter índices críticos ao crescimento radicular e ou limites críticos de produtividade das plantas é que o ambiente radicular está, usualmente, associado com fatores físicos e, freqüentemente, somente um ou dois destes fatores são medidos (Betz et al., 1998). Logsdon et al. (1987) estudaram o efeito associado da resistência à penetração, temperatura baixa, deficiência de oxigênio e deficiência hídrica e verificaram que as condições ótimas para o crescimento das raízes de milho em um solo

de textura média foram de $0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de umidade volumétrica e densidade do solo menor que $1,22 \text{ Mg m}^{-3}$.

A metodologia de determinação da densidade do solo crítica, quando o intervalo hídrico ótimo é nulo, é uma avaliação conjunta dos fatores diretamente relacionados com o crescimento das plantas, tais como, a resistência à penetração, a porosidade de aeração e o conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Os limites críticos de densidade do solo e de resistência à penetração existentes para as condições do Rio Grande do Sul foram obtidas, na sua maioria, em condições de camadas compactadas em vasos, e analisando cada propriedade do solo de forma isolada. A metodologia de determinação do IHO propõem a análise conjunta da resistência à penetração, porosidade de aeração e conteúdo de água, refletindo na densidade do solo, que é um índice de fácil comparação para solos de classe textural similares. O conhecimento do limite superior e do limite inferior do intervalo hídrico do solo auxiliará a tomada de decisão de quando irrigar ou se necessário, realizar operações de manejo do solo para reduzir o estado de compactação.

As maiores dificuldades na utilização do IHO referem-se à utilização de limites críticos de porosidade de aeração e de resistência à penetração não aceitos como limitantes para todas as condições de solos, clima e do tipo de planta.

O valor de densidade do solo onde o IHO é zero é considerado como a densidade do solo crítica ao desenvolvimento das plantas e medidas relacionadas à redução da densidade do solo ou da resistência à penetração deve ser tomada para adequar o solo às condições próximas das ideais para o desenvolvimento das plantas. A quebra da estrutura do solo, o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração e a diminuição da macroporosidade diminui o IHO para o desenvolvimento das culturas.

O objetivo deste estudo foi determinar o intervalo hídrico ótimo em três tipos de solos no RS, identificando limites críticos de densidade do solo onde a

resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento das plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho, coletou-se amostras com estrutura preservada em três classes de solos. Num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, localizado na área experimental do Depto de Solos, CCR-UFSM, Santa Maria, RS, cultivado sob plantio direto por 10 anos. Um Latossolo Vermelho distrófico, localizado em Cruz Alta, RS, na propriedade do Sr. Ulfried Arns, cultivado com plantio direto por 14 anos, e um Latossolo Vermelho distroférico, localizado em Coronel Barros, na propriedade do Sr. Arnaldo Yank, cultivado sob plantio direto por 7 anos.

Nas três áreas, foram realizadas determinações de resistência do solo à penetração para identificar estados de compactação provocados pelo manejo do solo (Figuras 6 a 8). Nos distintos estados de compactação (maior, intermediário e menor), foram coletadas amostras com estrutura preservada (5,36 cm de diâmetro por 3 cm de altura), em duas profundidades (1-4 cm e 10-13 cm), totalizando 180 amostras.

As amostras foram individualmente acondicionadas em recipientes plásticos e transportadas até o Laboratório de Física de Solos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP) em Piracicaba-SP. No laboratório, as amostras foram divididas em grupos e foram submetidas a tensões de 0,001; 0,006; 0,01; 0,1 e 1,5 MPa. Ajustou-se o modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980) nos valores de retenção de água, utilizando amostras com estrutura alterada no potencial de 1,5 MPa.

Após atingir o equilíbrio do potencial matricial, em cada amostra foi determinada a resistência do solo do solo à penetração, por meio de um penetrômetro eletrônico, com velocidade constante de penetração de 1 cm min⁻¹, e cone com diâmetro de base de 4 mm e ângulo de 30°. Esse penetrômetro é equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um

microcomputador para a aquisição dos dados (Tormena et al., 1998). Realizava-se uma determinação de resistência à penetração no centro de cada amostra, a cada 0,01 cm de profundidade. A resistência à penetração foi calculada pelo valor médio ao longo da profundidade da amostra, descartando-se os extremos.

Após a determinação da resistência à penetração (RP), as amostras foram colocadas em estufa a 105°C para determinações da densidade do solo (Ds) e da umidade volumétrica (θ). Os dados de RP foram ajustados em relação à θ e Ds, utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1990):

$$RP = a \cdot \theta^{b \cdot Ds^c} \quad [1]$$

onde, os coeficientes a , b e c são parâmetros do ajuste. Para ajuste dessa equação, extraiu-se o logaritmo natural dos valores de RP, θ e Ds e ajustou-se uma equação linear do tipo:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds \quad [2]$$

O IHO foi determinado para cada amostra conforme método proposto por Silva et al. (1994). O limite inferior do IHO foi considerado o conteúdo volumétrico de água no solo na resistência do solo do solo à penetração de raízes de 2 MPa (θ_{rp}) ou a quantidade de água no ponto de murcha permanente, considerada a umidade volumétrica do solo no potencial de -1,5 MPa ($\theta_{1,5}$). O limite superior do IHO foi considerado o conteúdo volumétrico de água no solo quando a porosidade de aeração é de 10 % (θ_{ar}) ou no conteúdo de água no solo na capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), considerada a água retida no solo no potencial de -0,01 MPa. Para cada valor de Ds, o IHO foi determinado pela diferença entre o limite superior e o limite inferior.

Em virtude da RP crítica ao desenvolvimento das plantas de 2 MPa ser motivo de contestações na literatura, foram realizadas duas simulações do

IHO: (i) condição de menor restrição ou plantas que conseguem desenvolver em RP de até 3 MPa e, (ii) condição de maior restrição onde às plantas já estariam sendo prejudicadas com RP de até 1 MPa. Os parâmetros porosidade de aeração de 10 %, umidade do solo na capacidade de campo ($\theta_{0,01}$) e umidade do solo no ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) foram o conteúdo de água no potencial de $-0,01$ MPa e o conteúdo de água no potencial de $-1,5$ MPa, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o Argissolo, a RP variou de 1,45 MPa a 3,85 MPa, a Ds de 1,38 MPa a 1,79 MPa e a θ de $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 3). No Latossolo Vermelho distrófico, o maior valor de RP foi de 5,96 MPa e o menor de 0,11 MPa, a Ds variou de $0,98 \text{ Mg m}^{-3}$ a $1,68 \text{ Mg m}^{-3}$ e a θ de $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para o Latossolo Vermelho distroférico típico, a RP variou de 0,30 MPa a 5,89 MPa, a Ds de $1,08 \text{ Mg m}^{-3}$ a $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$ e a θ variou de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Ao analisar o efeito da Ds e da umidade volumétrica nos valores de RP, o modelo duplo exponencial correlaciona melhor o resultado obtido de RP do que modelos lineares (Busscher, 1990; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2000). Modelos lineares que relacionam a RP com a umidade do solo são apresentados por alguns autores (Martino & Shaykewich, 1994, Genro Jr, 2002), porém para uma mesma faixa de Ds.

Com os valores de RP, Ds e θ foram obtidos os parâmetros para o modelo $RP = a * \theta^b * Ds^c$ (Busscher, 1990), apresentados na tabela 4. Os coeficientes “b” e “c” do modelo proposto tornam-se mais negativos conforme aumenta o teor de argila do solo, significando que esses parâmetros foram mais influenciados pela Ds e pela θ nos solos argilosos do que no solo arenoso.

TABELA 3. Valores médios, máximo e mínimo para a resistência do solo à penetração (RP), da umidade volumétrica do solo (θ) e da densidade do solo (Ds).

Valor	RP (MPa)	θ (m ³ m ⁻³)	Ds (Mg m ⁻³)
-----Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico-----			
Média	1,45	0,26	1,59
Máximo	3,85	0,42	1,79
Mínimo	0,09	0,16	1,38
-----Latossolo Vermelho distrófico-----			
Média	2,06	0,37	1,37
Máximo	5,96	0,53	1,68
Mínimo	0,11	0,21	0,98
-----Latossolo Vermelho distroférico-----			
Média	2,24	0,41	1,40
Máximo	5,89	0,51	1,58
Mínimo	0,30	0,29	1,08

TABELA 4. Valores dos parâmetros estimados para o modelo da curva de resistência do solo para três tipos de solos em três estados de compactação.

Estados de compactação	a	B	c	r ²
-----Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico-----				
Maior	0,0288	-2,202	1,954	0,713*
Intermediário	0,0853	-2,151	0,562	0,842*
Menor	0,0084	-2,545	2,553	0,707*
-----Latossolo Vermelho distrófico-----				
Maior	0,0126	-3,055	6,077	0,750*
Intermediário	0,0155	-2,634	5,548	0,849*
Menor	0,0155	-2,682	6,409	0,910*
-----Latossolo Vermelho distroférico-----				
Maior	0,0053	-4,761	5,07	0,676*
Intermediário	0,0084	-3,985	5,538	0,760*
Menor	0,0040	-4,159	6,872	0,815*

Modelo: $RP = a \cdot \theta^b \cdot Ds^c$; * significativo a 1 % de probabilidade.

A estimação da RP pelos modelos empíricos gerados nos três solos foi satisfatória (Figura 9), embora houvesse uma menor dispersão dos dados nos valores baixos de RP comparados aos valores mais elevados, principalmente para o Latossolo Vermelho distroférico típico.

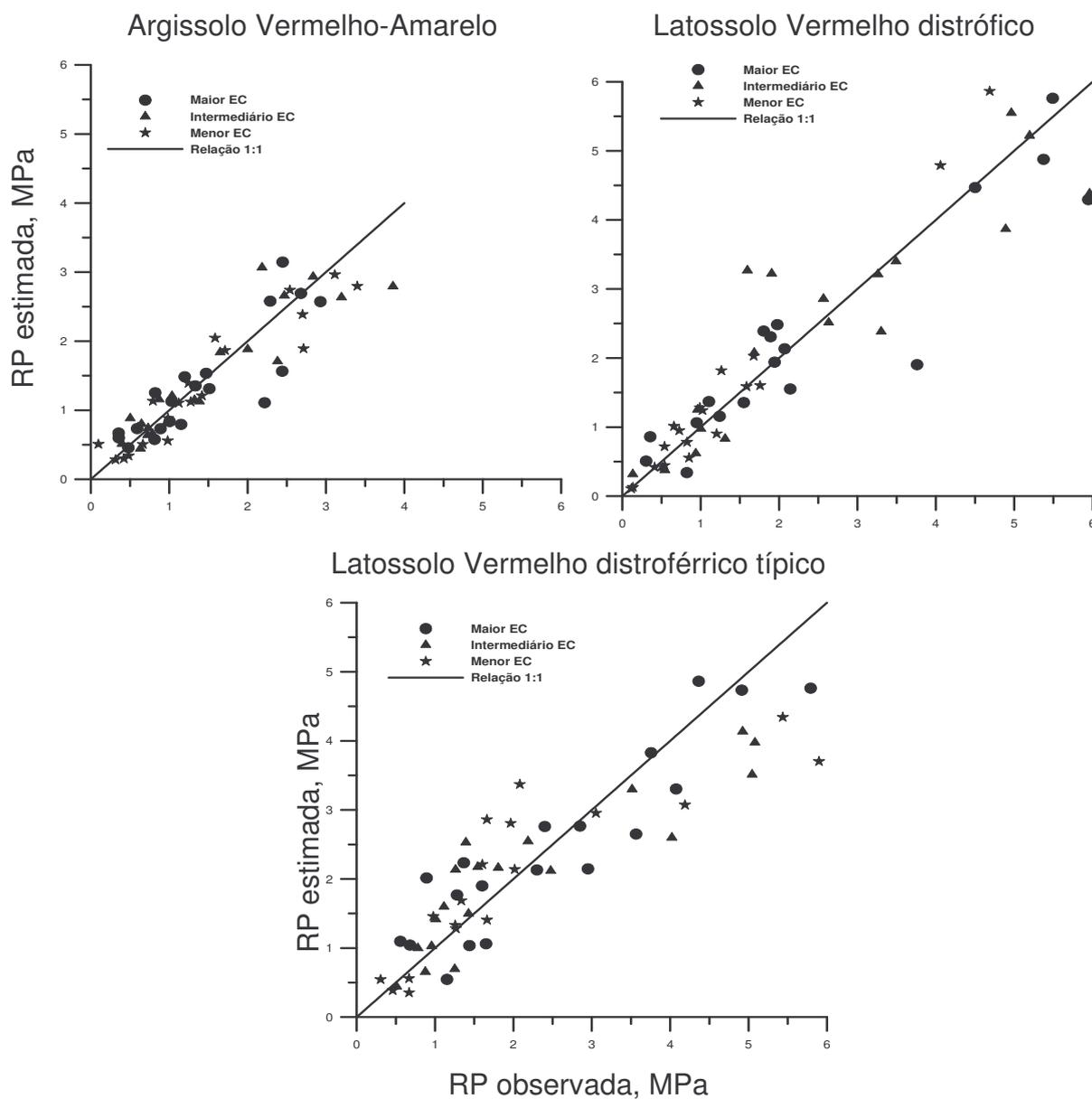


FIGURA 9. Relação da resistência do solo à penetração estimada pelo modelo de Busscher (1990) e resistência do solo medida.

O conteúdo de água no potencial de $-1,5$ MPa é relacionado como o conteúdo de água no ponto de murcha permanente. A sua determinação em membrana de Richards demanda muito tempo e para amostras com estrutura preservada, a lenta condutividade do solo pode proporcionar valores errôneos

de conteúdo de água no potencial de $-1,5$ MPa. A relação 1:1 entre umidade volumétrica determinada em amostras com estrutura alterada e amostras com estrutura preservada indicou que houve um maior conteúdo de água no potencial de $-1,5$ MPa em amostras com a estrutura preservada do que na determinação com estrutura alterada (Anexo D), principalmente para o Argissolo Vermelho-Amarelo. Sugere-se a estimativa do conteúdo de água no solo no potencial de $-1,5$ MPa em amostras com estrutura alterada.

A importância de conhecer a relação entre a $\theta_{0,01}$ e a D_s consiste na possibilidade de aumentar a quantidade de água armazenada no solo, principalmente em áreas que possuem baixa densidade. Uma moderada compactação da superfície do solo (até 30 cm) pelo tráfego de máquinas aumentou o rendimento do milho em um ano considerado seco e o oposto foi verificado em um ano relativamente úmido em clima temperado (Amazodo et al., 1983). Os autores atribuíram o maior rendimento de milho em ano seco ao maior conteúdo de água armazenado no solo proporcionado pelo aumento da D_s .

O aumento de densidade provoca redução do espaço de poros do solo e macroporosidade é reduzida em maior proporção do que a porosidade total. Por isso, dependendo do estado inicial de compactação do solo, pode-se esperar um aumento da $\theta_{0,01}$ com o aumento da densidade do solo, oriundo do aumento de microporos que retêm água em menores potenciais ou em um estado de maior compactação quando a redução da $\theta_{0,01}$ se dá em função da redução da porosidade total. Neste trabalho, podemos verificar que no Argissolo, a $\theta_{0,01}$ e a $\theta_{1,5}$ relacionaram-se negativamente com a D_s , indicando que o aumento de D_s provoca redução da porosidade total, diminuindo a quantidade de água no solo (Figura 10). Esse efeito da D_s na retenção de água não era esperado para a $\theta_{1,5}$, haja vista que, nessas tensões, o efeito da estrutura na retenção de água seria praticamente nulo.

No Latossolo Vermelho distrófico, a $\theta_{0,01}$ e a $\theta_{1,5}$ relacionaram-se positivamente com o aumento da D_s (Figura 11). Esses resultados concordam

com os valores observados por Tormena et al. (1998; 1999), num Latossolo Vermelho da região nordeste do estado de São Paulo.

No Latossolo Vermelho distroférico típico, a $\theta_{0,01}$ foi decrescente com o aumento da Ds (Figura 12) e a $\theta_{1,5}$ foi positivamente correlacionada com o aumento da Ds. Silva et al. (1994) também encontraram diferenças entre o comportamento dessas relações com o tipo de solo. No solo siltoso (180 g kg⁻¹ de argila, 520 g kg⁻¹ de silte e 300 g kg⁻¹ de areia), a $\theta_{0,01}$ e a $\theta_{1,5}$ foram negativamente correlacionadas com a Ds e foram positivamente correlacionadas para o solo arenoso (60 g kg⁻¹ de argila e 780 g kg⁻¹ de areia).

Limite crítico de resistência do solo à penetração de 2 MPa

Utilizando valores críticos de RP de 2 MPa e de porosidade de 10 %, determinou-se o IHO para cada estado de compactação em cada solo. No Argissolo Vermelho-Amarelo, o limite superior do IHO foi a $\theta_{0,01}$ até a Ds de aproximadamente 1,60 Mg m⁻³ e, a partir desta, o limite superior foi a θ_{ar} . O limite inferior do IHO foi à resistência à penetração de 2 MPa em todas as amostras para todos os estados de compactação.

O conhecimento de qual propriedade do solo está limitando o crescimento das plantas é importante para definir estratégias de manejo do solo para aumentar o IHO. Quando o limite superior for a θ_{ar} e o limite inferior for a θ_{rp} , interferências no manejo do solo podem, facilmente, aumentar o IHO. Porém, quando o limite superior e o limite inferior do IHO são a $\theta_{0,01}$ e a $\theta_{1,5}$, o manejo dado ao solo tem pouca influência sobre estes parâmetros.

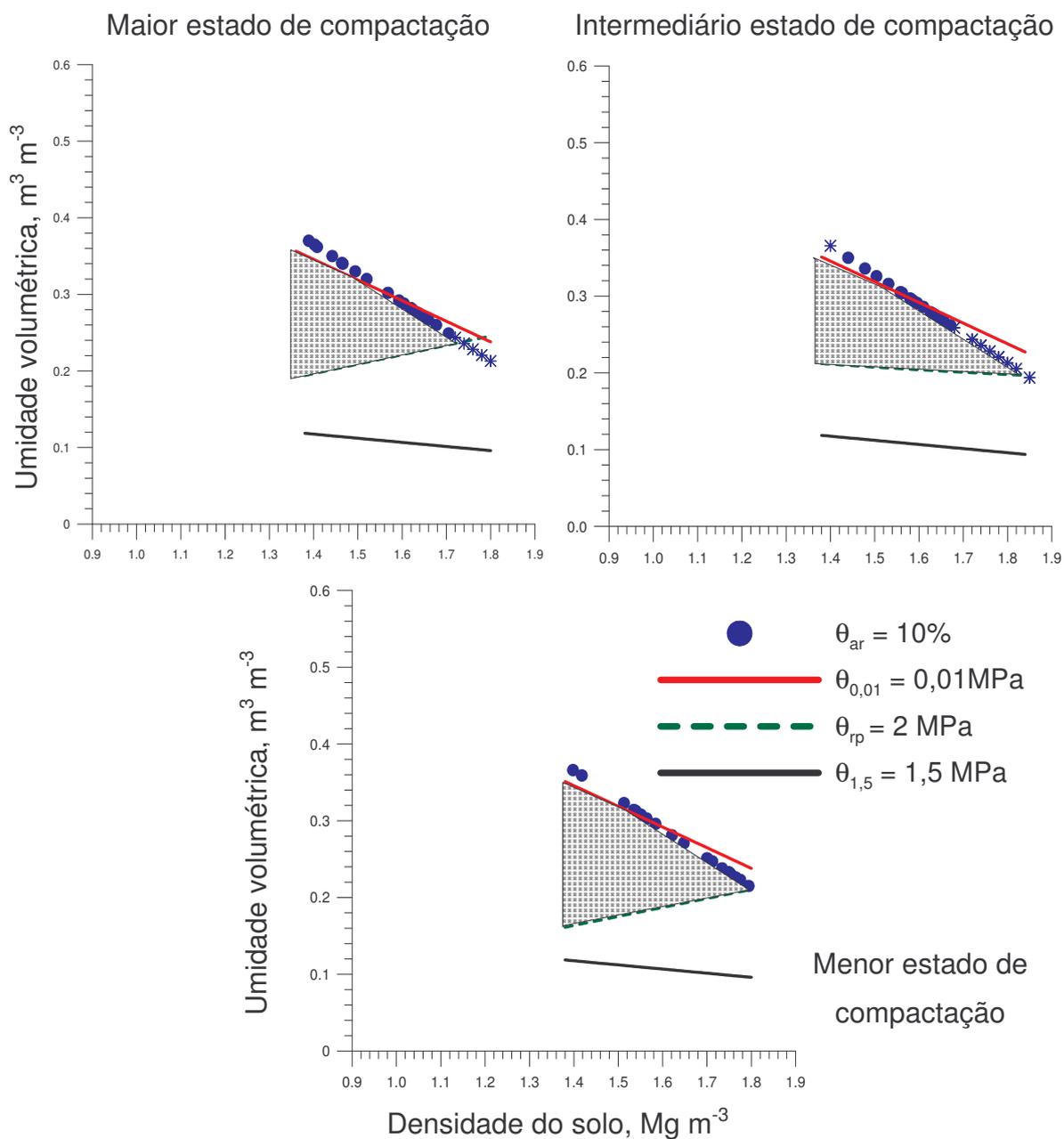


FIGURA 10. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis críticos da porosidade de aeração (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

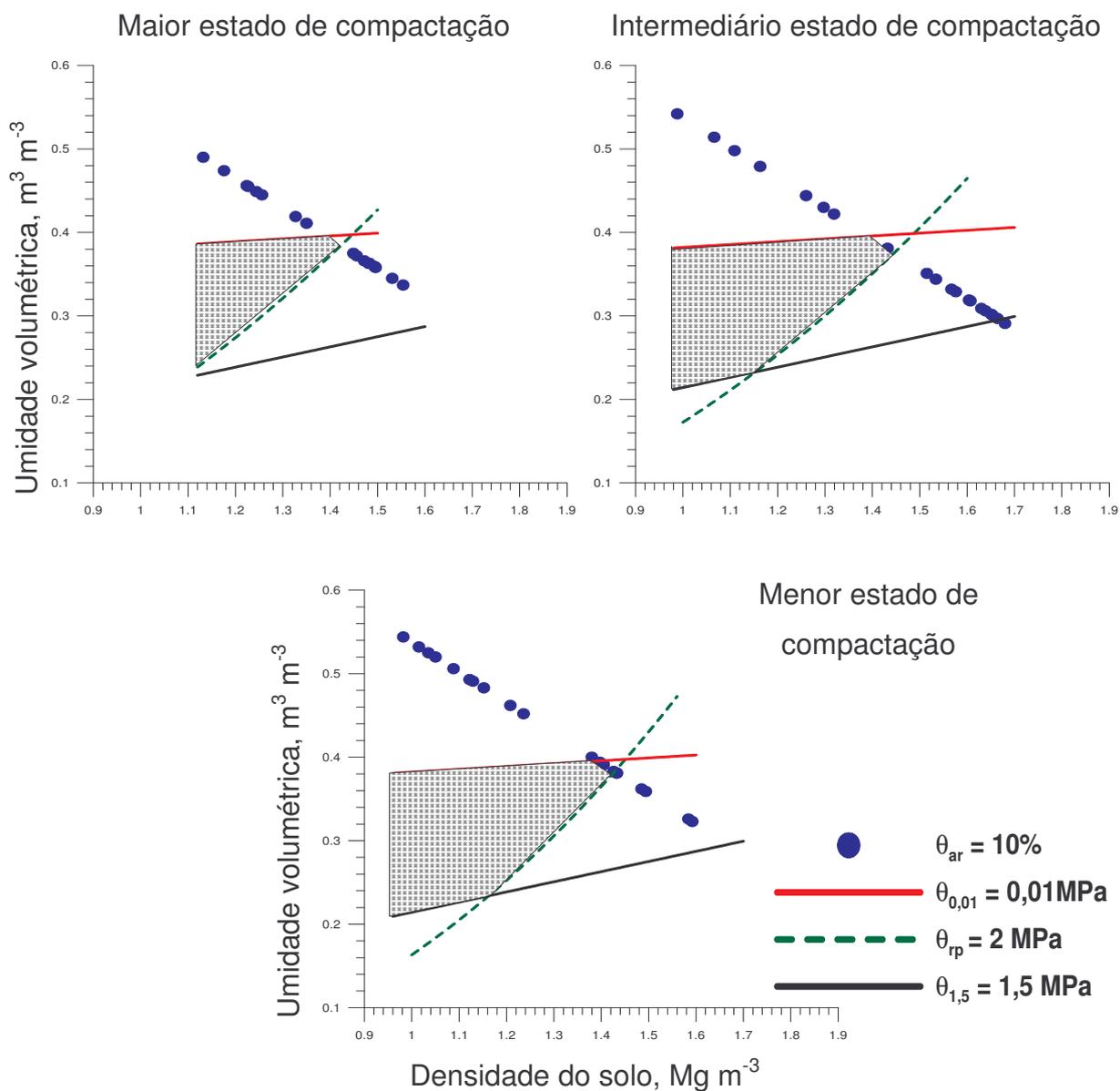


FIGURA 11. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis críticos da porosidade de aeração (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

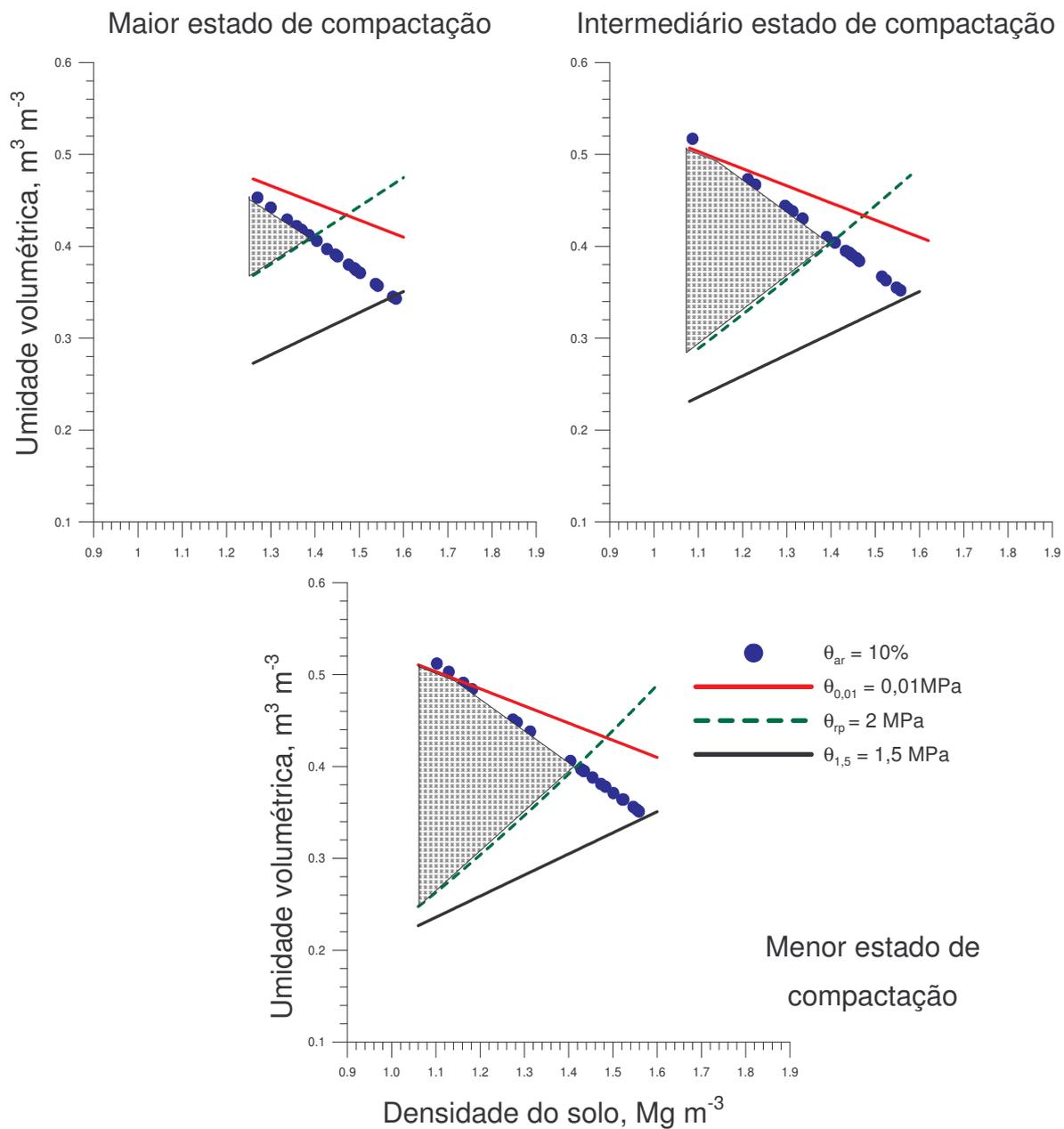


FIGURA 12. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis críticos da porosidade de aeração (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo.

No Latossolo Vermelho distrófico, a $\theta_{0,01}$ foi o limite superior na situação de D_s menores que $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ e o limite inferior do IHO foi a $\theta_{1,5}$ até a D_s de $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$, em todos os estados de compactação. Neste tipo de solo, a curva de resistência do solo aumenta rapidamente em função do aumento da D_s . Para Tormena et al. (1999), em um Latossolo Vermelho sob plantio direto, a variação de D_s foi de $0,95 \text{ Mg m}^{-3}$ até $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ e o limite inferior do IHO foi a $\theta_{1,5}$ até a D_s de $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$, a partir desse valor de D_s , a θ_{rp} passou a ser o limite inferior do IHO. No Latossolo Vermelho distroférico típico, o limite superior foi a θ_{ar} em quase todas as condições de D_s . O limite inferior foi a θ_{rp} em todos os estados de compactação. Indicando que os valores de D_s encontrados neste solo estão restringindo os valores do IHO. Esses resultados concordam com Silva et al. (1994), que observaram efeito maior da D_s na θ_{ar} e na θ_{rp} do que na $\theta_{0,01}$ e na $\theta_{1,5}$, indicando que o IHO foi mais sensível a variações na estrutura do solo do que a quantidade de água disponível, compreendida entre a $\theta_{0,01}$ e a $\theta_{1,5}$.

Das figuras que relacionam o conteúdo de água no solo onde os fatores físicos do solo não são limitantes para a produtividade das plantas, obtém-se a densidade do solo onde as condições ideais para o desenvolvimento das plantas são nulas, ou seja, a densidade do solo crítica para o desenvolvimento das plantas. Neste estudo, no Argissolo, a D_s onde o IHO é zero foi de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ no maior estado de compactação e de $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ nos outros estados de compactação. Silva et al. (1994) verificaram que na D_s acima de $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ foi o limite crítico para o desenvolvimento das plantas, em solo franco arenoso, e D_s crítica de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ em um solo franco argiloso.

No Latossolo Vermelho distrófico a D_s crítica foi de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ e no Latossolo Vermelho distroférico típico, de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$. Analisando os resultados encontrados na literatura, percebemos que a D_s crítica (onde o IHO é igual a zero) diminui com o aumento do teor de argila (Betz et al., 1998; Imhoff et al., 2001), variando de $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ para um Latossolo com 800 g kg^{-1}

de argila (Tormena et al., 1999) a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para um solo franco arenoso com 60 g kg^{-1} de argila (Silva et al., 1994).

Analisando para cada densidade do solo a diferença entre o limite superior e o limite inferior do IHO, percebemos que os estados de compactação não influenciaram os valores do IHO e, por isso, os dados foram agrupados apenas para cada tipo de solo. Em virtude dessa constatação, refuta-se a hipótese de que a densidade do solo crítica é variável conforme a variação dos estados de compactação, para o mesmo tipo de solo.

O IHO foi negativamente correlacionado com a D_s para os três tipos de solos. No Latossolo Vermelho distrófico a diminuição do IHO foi pequena até a D_s de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ e, após essa, a diminuição do IHO foi mais acentuada devido à influência da curva de resistência do solo (Figura 13). No Latossolo Vermelho distroférico típico e no Argissolo Vermelho-Amarelo, devido à curva de θ_{rp} ser o limite inferior do IHO já nas menores D_s , o declínio do IHO foi de forma quase linear com a D_s . Para Silva et al. (1994), o IHO foi decrescente com o aumento da D_s para o solo franco siltoso (330 g kg^{-1} de argila) e para o solo franco arenoso (780 g kg^{-1} de areia), o IHO apresenta um pequeno incremento até a D_s de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ e, a partir desta D_s , o IHO decresce com a D_s . Tormena et al. (1999) verificaram um pequeno aumento do IHO da D_s de $0,95 \text{ Mg m}^{-3}$ até a D_s $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$ e nas maiores D_s , o IHO reduziu até o valor zero na D_s de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$.

No argissolo, o valor máximo do IHO foi de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no menor valor de D_s , igual ao valor do IHO na D_s de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ no Latossolo Vermelho distrófico. O maior valor do IHO foi de $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o Latossolo Vermelho distroférico típico, com D_s de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$.

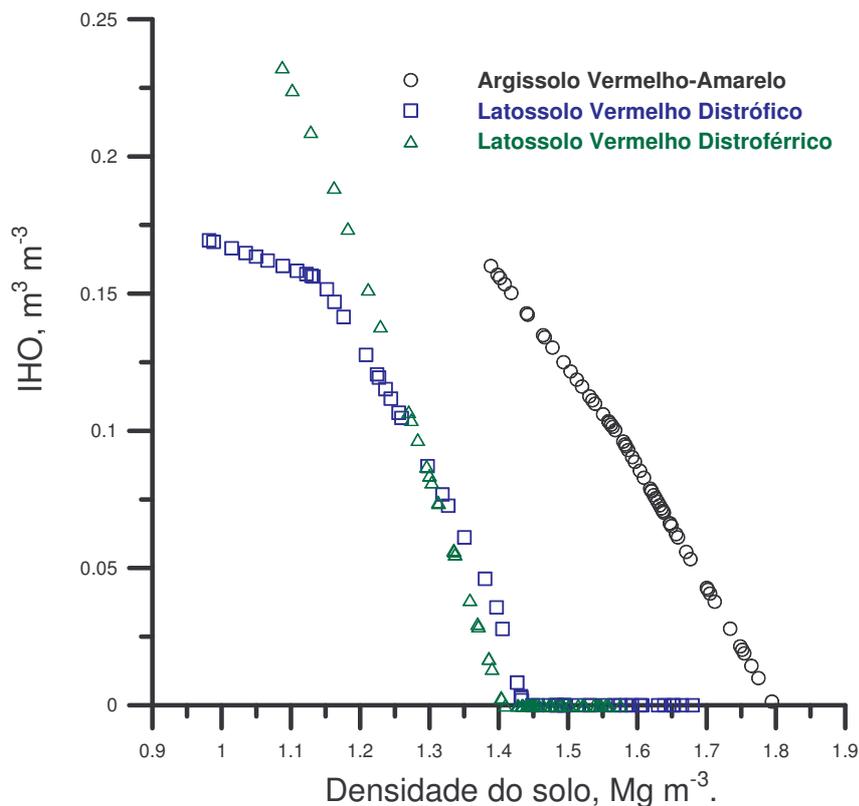


FIGURA 13. Variação do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, para $\theta_{ar} = 10\%$, $\theta_{0,01}$ a umidade na tensão de 0,01 MPa (capacidade de campo), $\theta_{rp} = 2$ MPa e $\theta_{1,5}$ = umidade no ponto de murcha permanente.

Classicamente, a água disponível é considerada como a quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente e é muito utilizada para manejar a necessidade de irrigação. Porém, tem sido motivo de contestações por diversos autores que consideram que as plantas já estariam sentindo limitações de produtividade em teores de água do solo acima do ponto de murcha permanente (Ritchie, 1981; Letey, 1985; Carlesso, 1995). Neste estudo, analisando apenas a diferença de umidade volumétrica entre a $\theta_{0,01}$ e a $\theta_{1,5}$ em todos os estados de compactação, verificamos que, o aumento da Ds diminuiu a quantidade de água no solo considerada disponível às plantas (Figura 14). A maior quantidade de água disponível foi para o solo Latossolo Vermelho distróférrico

típico e também, nesse solo, ocorreram as maiores reduções da quantidade de água disponível com o aumento da D_s .

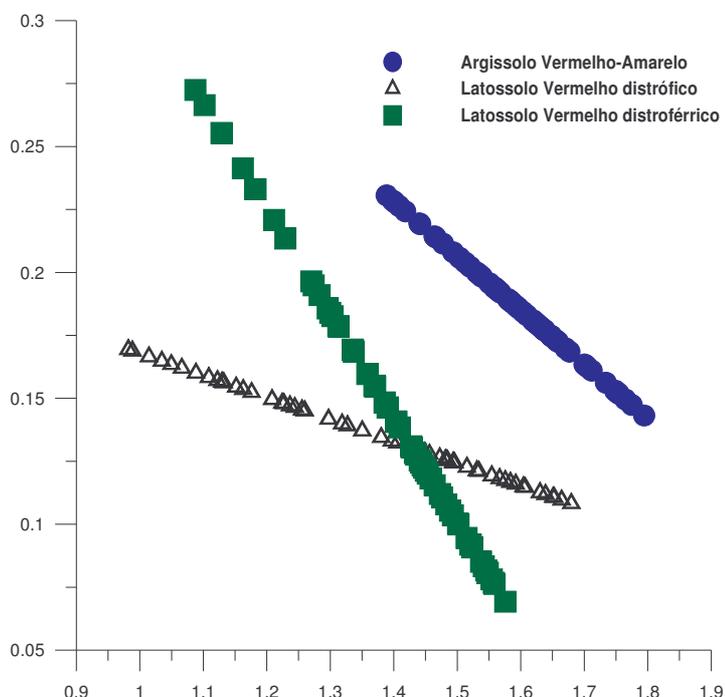


FIGURA 14. Valores de água disponível no solo, compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, em função do aumento da densidade do solo.

Silva & Kay (1997) verificaram que a D_s teve um efeito negativo na retenção de água nos potenciais maiores que $-0,07$ MPa e a retenção foi positivamente correlacionada com a D_s nos potenciais mais negativos que $-0,07$ MPa. Nos potenciais maiores (próximos a zero), a porosidade total é o fator dominante na retenção de água, resultando em decréscimo da umidade com o aumento da D_s . Já em potenciais mais negativos, a retenção de água é primeiramente controlada pelo número e volume relativo de pequenos poros, que correlacionam positivamente com a D_s . Sharma & Uehara (1968) concluíram que o efeito da estrutura do solo na retenção de água se dá até a tensão de $-0,02$ MPa. A retenção e o fluxo de água no solo depende, em grande parte, da distribuição de poros, a qual envolve o efeito da forma,

tamanho e disposição das partículas primárias que formam o solo, sendo reflexo da textura e da estrutura do solo.

Devido a incertezas de quais são os valores de RP que restringem o crescimento das plantas e sabendo-se que diferentes plantas respondem de maneira diferente aos limites críticos, realizaram-se simulações considerando (i) uma condição de planta mais resistente à compactação (limites críticos de RP de 3 MPa) e (ii) uma condição de planta mais sensível à compactação (limites críticos de RP de 1 MPa). O valor da porosidade de aeração foi considerada de 10 %.

Limite crítico de resistência do solo à penetração de 3 MPa

Na situação hipotética de plantas mais resistentes à compactação, com e RP crítica de 3 MPa, o limite superior do IHO foi o conteúdo de água do solo na capacidade de campo no intermediário EC e nas densidades menores que $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ nos demais EC no Argissolo (Figura 15). O limite inferior foi a θ_{rp} de 3 MPa em todos os estados de compactação. Nessas condições críticas de RP, a Ds quando o IHO é zero foi de $1,88 \text{ Mg m}^{-3}$ no maior e no menor estado de compactação. Para o intermediário EC, esse valor é um pouco superior a $1,90 \text{ Mg m}^{-3}$.

No Latossolo Vermelho distrófico, o limite superior do IHO foi a $\theta_{0,01}$ na maioria das amostras. Apenas quando a Ds foi acima de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ a θ_{ar} de 10 % foi o limite superior do IHO (Figura 16). A curva de RP foi o limite inferior quando a Ds foi maior que $1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ no maior EC e de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ no intermediário EC e menor EC. O valor de Ds quando o IHO é igual a zero foi $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ para os três estados de compactação.

No Latossolo Vermelho distroférico típico, a curva de RP foi o limite inferior em todas as amostras (Figura 17). Quanto ao limite superior, a θ_{ar} de 10 % foi o limite superior em todos os estados de compactação. O valor de Ds onde o IHO é igual a zero foi de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ nos três estados de compactação.

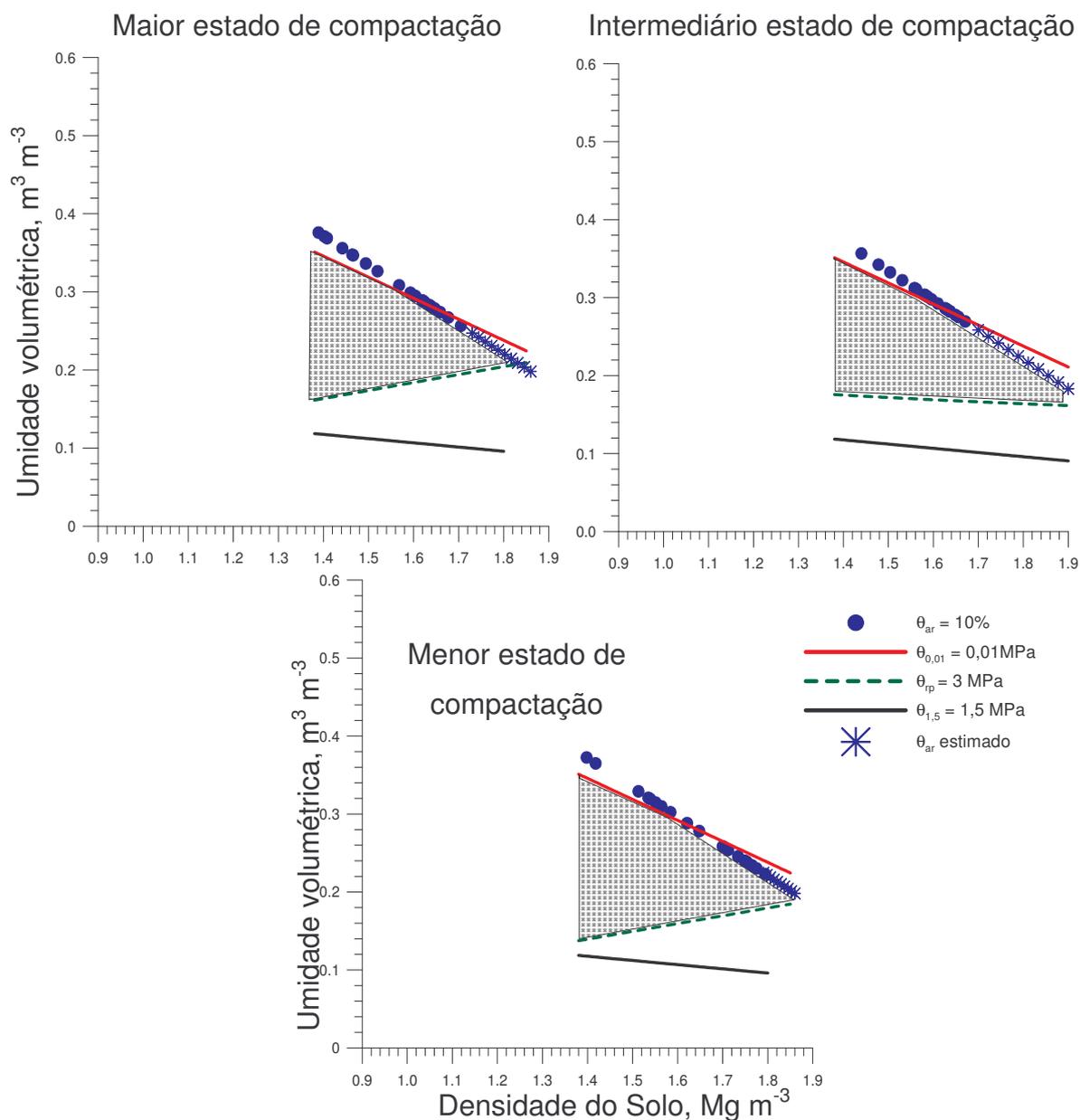


FIGURA 15. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo.

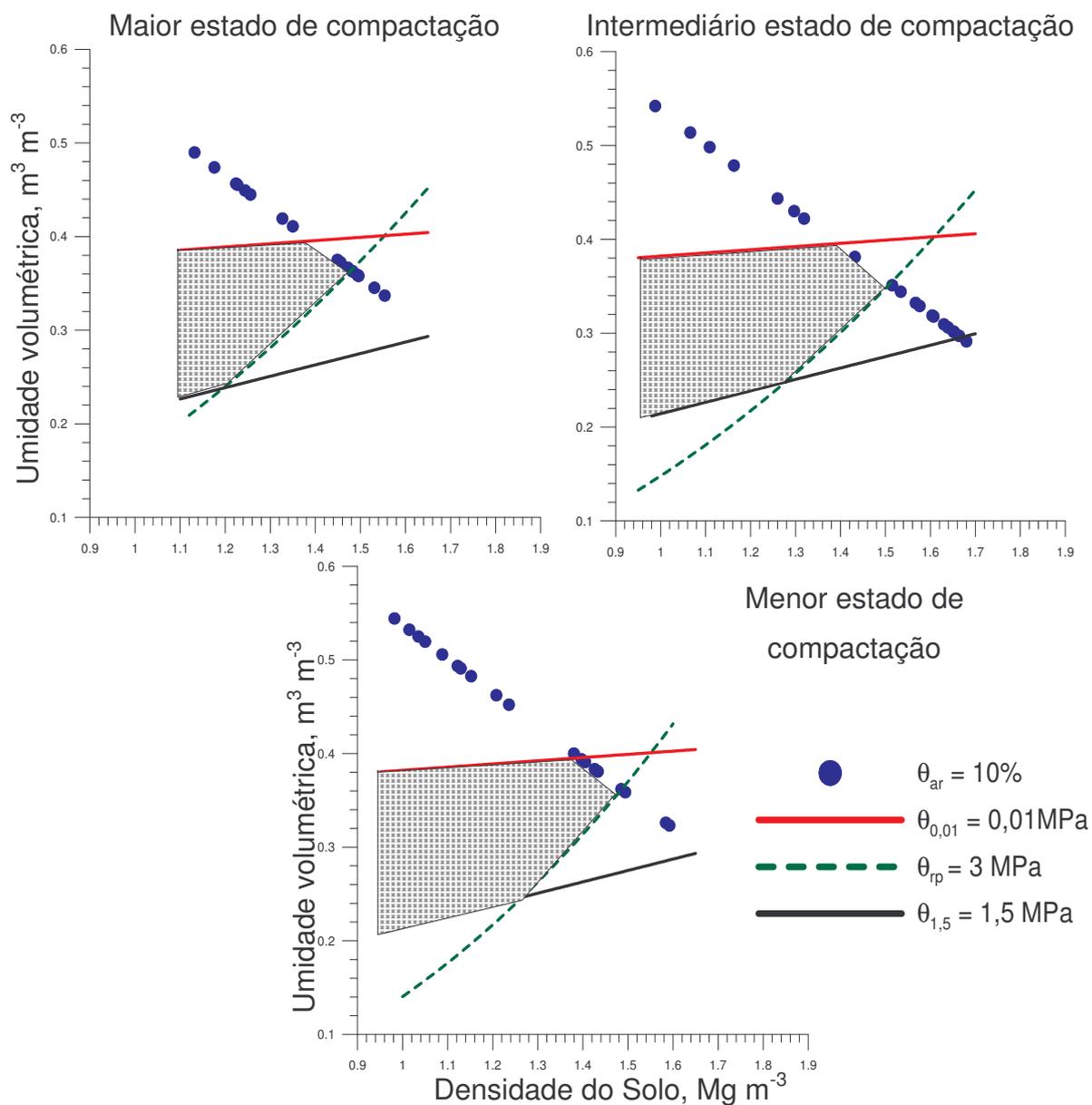


FIGURA 16. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo a penetração de 3 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

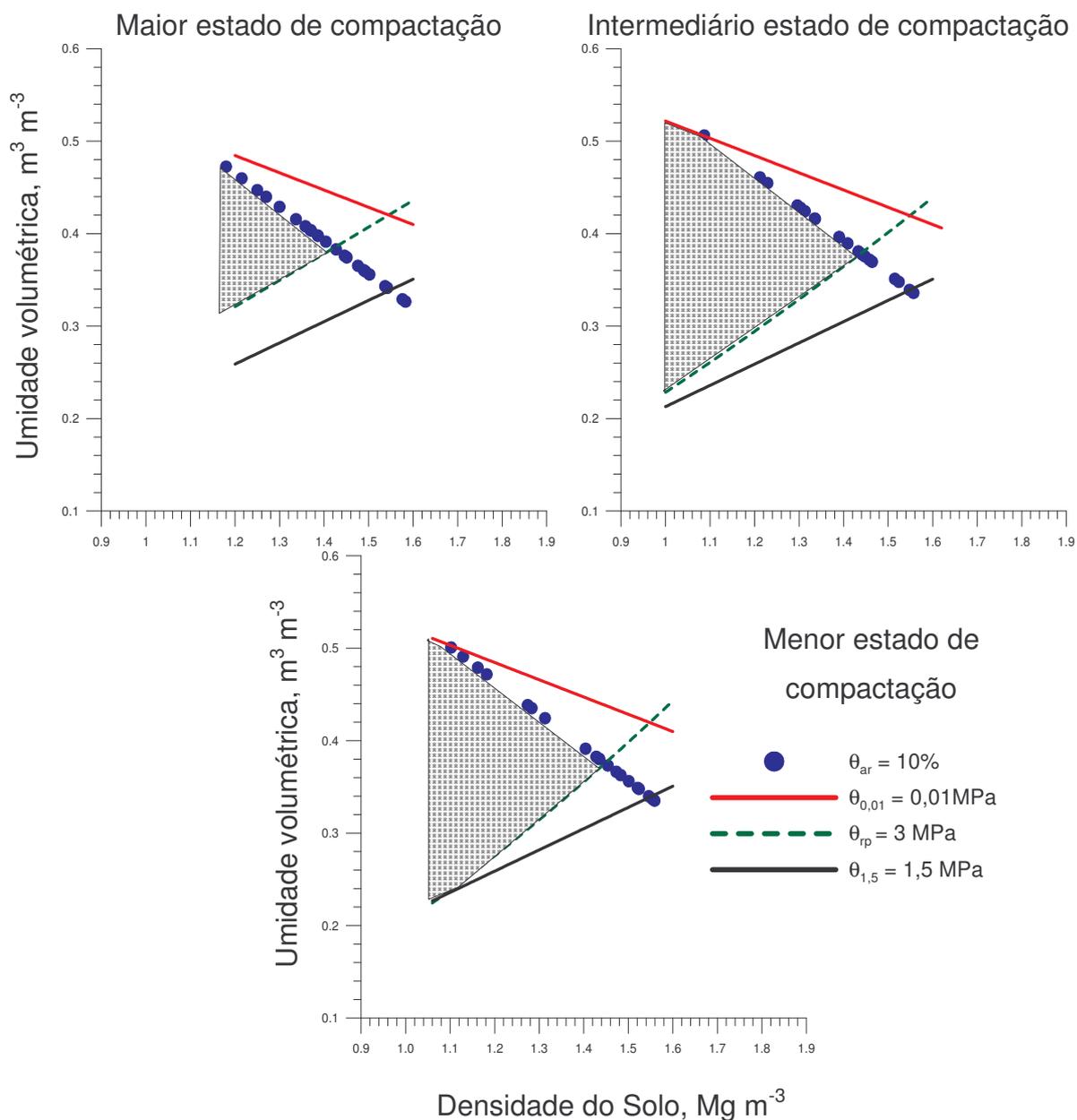


FIGURA 17. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 3 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

Limite crítico de resistência do solo à penetração de 1 MPa

Na situação hipotética de plantas menos resistente à compactação, com RP crítica de 1 MPa, percebemos que o limite inferior foi a RP em todas as amostras e o limite superior foi a $\theta_{0,01}$ para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Figura 18). O valor da Ds crítica foi próximo de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ nos três estados de compactação. Percebe-se que o valor do conteúdo de água compreendido entre o limite inferior e o limite superior foi pequeno, implicando em maiores dificuldades de manejo do solo, água e da planta para proporcionar um adequado desenvolvimento e alta produtividade das plantas.

No Latossolo Vermelho distrófico, o limite superior foi a $\theta_{0,01}$ e o limite inferior foi a θ_{rp} de 1 MPa (Figura 19). A Ds onde o IHO é zero foi de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$.

No maior EC no Latossolo Vermelho distroférico típico, o estado atual de compactação foi limitante às plantas e o IHO foi pequeno (Figura 20). A θ_{ar} foi o limite superior em todos os estados de compactação e a Ds crítica para este tipo de solo e para esta condição de limites críticos foi de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$.

Na situação de plantas mais sensíveis à compactação, os valores de IHO para os três tipos de solos são pequenos. Na situação de plantas mais resistentes à compactação, o IHO é mais amplo. Portanto, são necessários maiores estudos na identificação de limites críticos de porosidade de aeração e resistência do solo à penetração de raízes para as principais culturas econômicas do país.

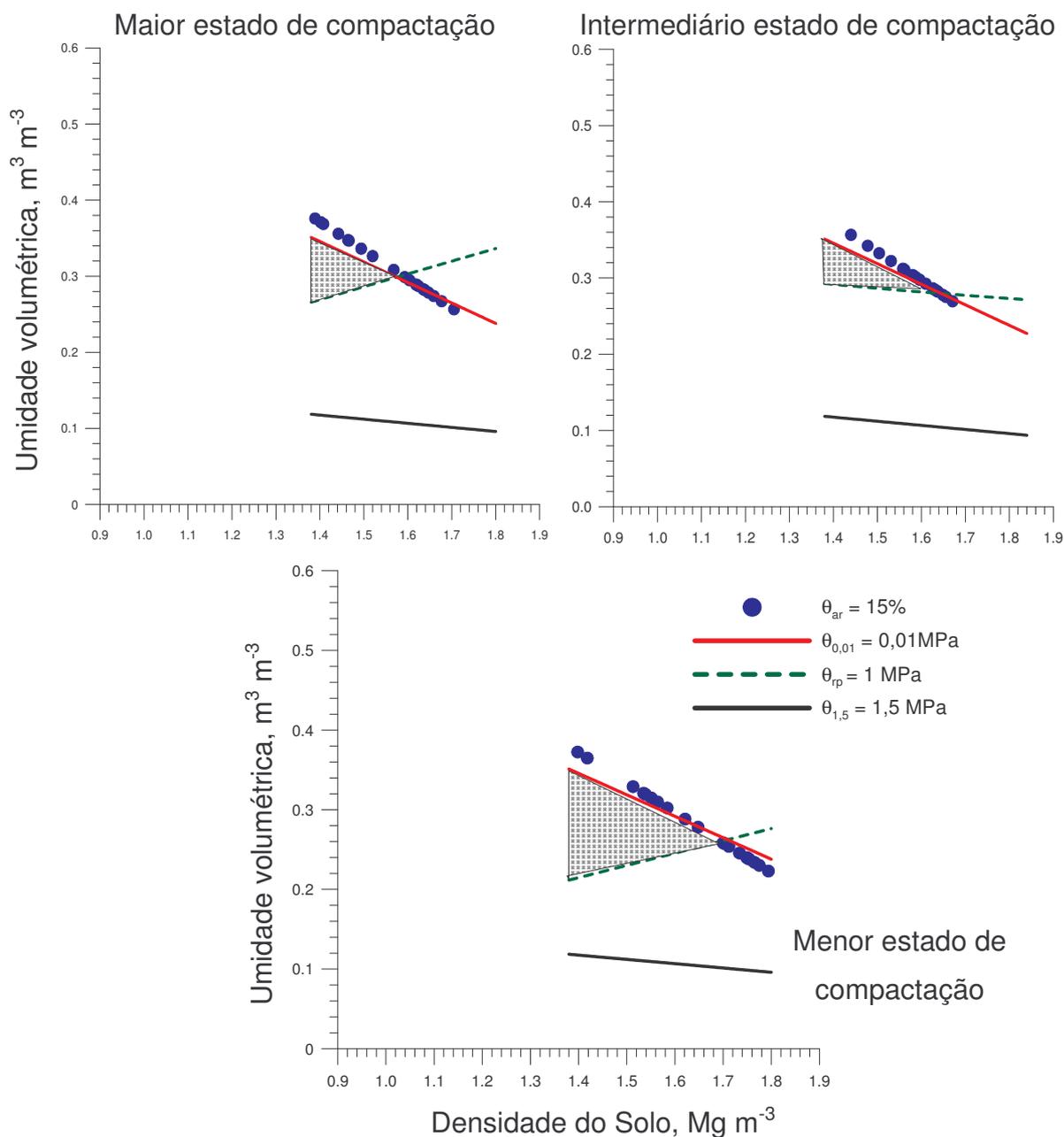


FIGURA 18. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 1 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

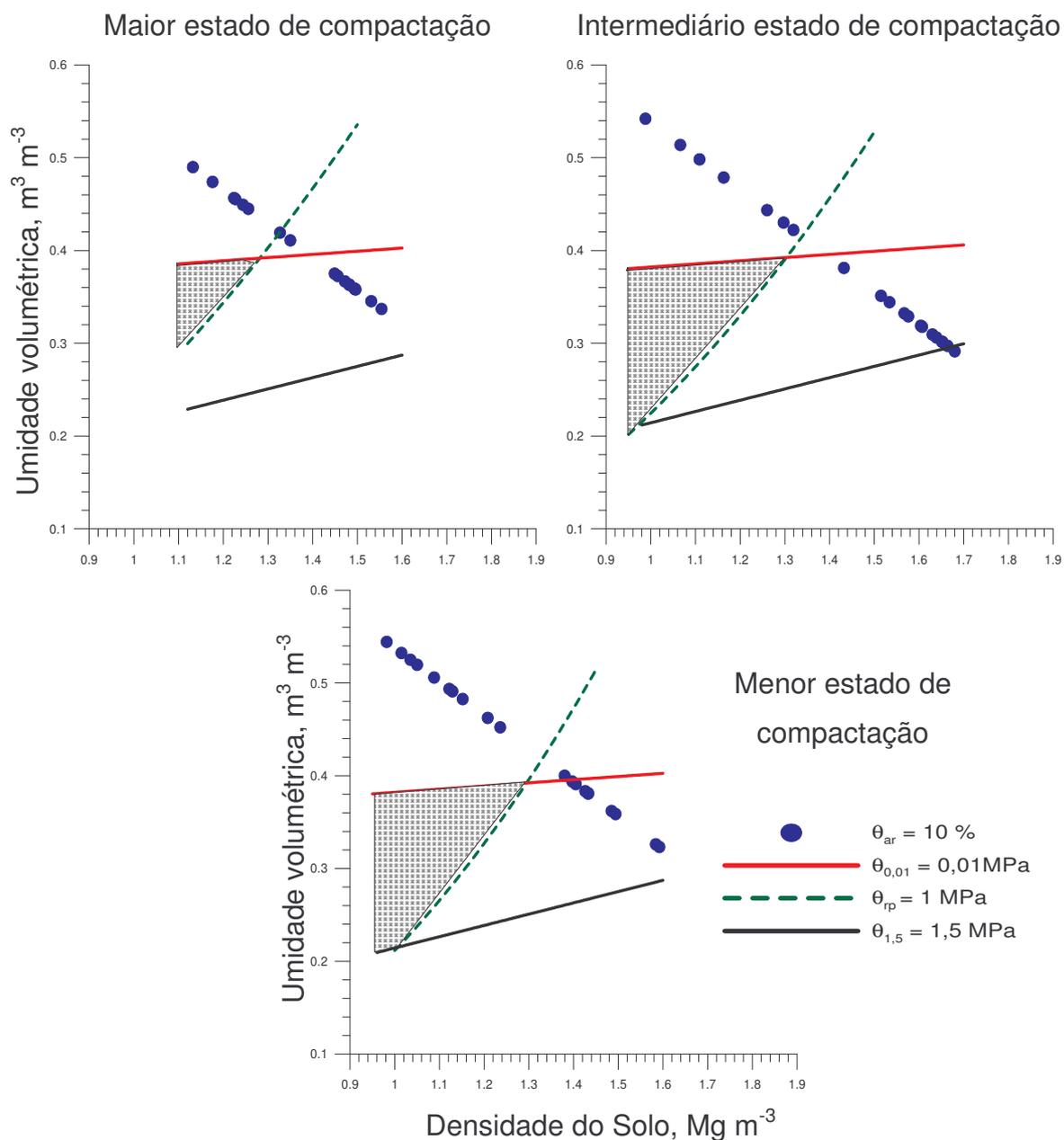


FIGURA 19. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 1 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distrófico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

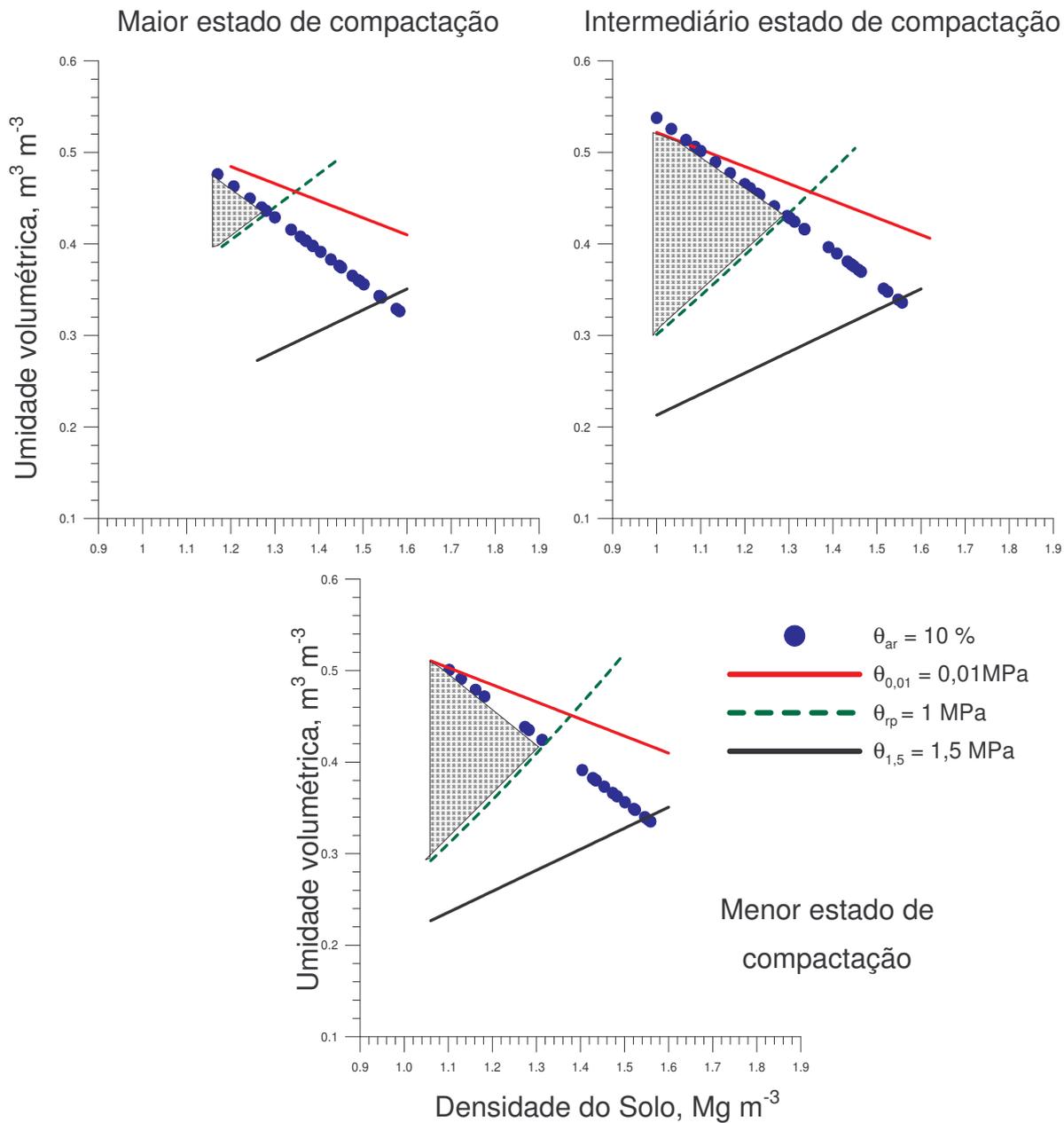


FIGURA 20. Variação do conteúdo de água no solo com a densidade do solo nos níveis de porosidade de aeração de 10 % (θ_{ar}), capacidade de campo ($\theta_{0,01}$), resistência do solo à penetração de 1 MPa (θ_{rp}) e ponto de murcha permanente ($\theta_{1,5}$) para o Latossolo Vermelho distroférico típico. Área hachureada representa o intervalo hídrico ótimo.

CONCLUSÕES

O modelo duplo exponencial, utilizando a densidade do solo e a umidade volumétrica como variáveis medidas, pode ser utilizado na estimação dos valores de resistência do solo à penetração em solo sob plantio direto.

Os estados de compactação não influenciaram os valores do intervalo hídrico ótimo nem a densidade do solo onde o intervalo hídrico ótimo do solo é zero.

A densidade do solo na qual o intervalo hídrico ótimo é zero foi de 1,8 Mg m^{-3} para o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, de 1,43 Mg m^{-3} para o Latossolo Vermelho distrófico e de 1,40 Mg m^{-3} para o Latossolo Vermelho distroférico típico nas condições de porosidade crítica de aeração de 10 % e resistência do solo à penetração crítica de 2 MPa.

Nas simulações de condições de plantas mais sensíveis à compactação, resistência à penetração crítica de 1 MPa, a densidade do solo onde o intervalo hídrico ótimo é zero foi de 1,60 Mg m^{-3} no Argissolo, 1,30 Mg m^{-3} no Latossolo Vermelho distrófico e 1,28 Mg m^{-3} no Latossolo Vermelho distroférico típico. Na situação de plantas mais resistentes à compactação, com resistência à penetração crítica de 3 MPa, a densidade onde o intervalo hídrico ótimo é zero foi de 1,90 Mg m^{-3} no Argissolo, 1,5 Mg m^{-3} no Latossolo Vermelho distrófico e 1,44 no Latossolo Vermelho distroférico típico.

O intervalo hídrico ótimo foi mais sensível em mostrar a redução das condições ideais para o desenvolvimento das plantas do que a quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

CAPÍTULO 3. PARÂMETROS HÍDRICOS DO SOLO EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO.

RESUMO

A taxa de infiltração de água no solo, o armazenamento e disponibilidade para as plantas são determinantes do potencial de produção. O objetivo deste estudo foi determinar, em solo sob plantio direto e em área escarificada, propriedades hidráulicas do solo, tais como, a infiltração de água no solo, a condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) e em solo não saturado (K_{θ}) e a curva de retenção de água do solo em diferentes estados de compactação em dois latossolos. Coletaram-se amostras com estrutura preservada para determinação da condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) determinado em laboratório. No campo, determinou-se a K_{sat} com o permeâmetro de Guelph, a infiltração de água no solo foi determinado pelo método dos anéis concêntricos e a condutividade hidráulica em solo não saturado pelo método do perfil instantâneo. No Latossolo Vermelho distrófico, a K_{sat} determinada no campo foi de 26,76 cm h^{-1} no menor estado de compactação e de 9,18 cm h^{-1} no maior estado de compactação. No Latossolo Vermelho distroférico típico, a K_{sat} no menor estado de compactação foi de 5,16 cm h^{-1} e no maior estado de compactação, foi de 1,88 cm h^{-1} . A infiltração de água no solo não variou entre os estados de compactação nos dois latossolos. A condutividade hidráulica em solo não saturado foi maior no tratamento com escarificação do solo comparado ao plantio direto. A capacidade de campo, determinada no campo, ocorreu 24 horas após o início da drenagem, no Latossolo Vermelho distrófico. O valor de umidade volumétrica na tensão de -10 kPa pode ser utilizada na estimação da capacidade de campo para o Latossolo Vermelho distrófico.

INTRODUÇÃO

Na agricultura, a água é essencial ao desenvolvimento das plantas e regula os demais fatores físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento e a produtividade das culturas (Forsythe, 1967; Letey, 1985). A disponibilidade de água às culturas é variável de acordo com as condições climáticas, tipo de solo e necessidade da planta. Além disso, o manejo dado ao solo é muito importante no aumento ou redução da disponibilidade hídrica dos solos. Para um mesmo valor de potencial matricial de um solo franco siltoso e de um solo franco arenoso do Canadá, o plantio direto reteve mais água do que o solo com preparo convencional (Azooz et al., 1996). Wu et al. (1992) verificaram maior retenção de água no horizonte A_p de um solo franco siltoso sob plantio direto do que no convencional, porém não foi verificado para um solo franco argiloso. Canalli & Roloff (1997), em um Latossolo Vermelho distrófico, verificaram menor quantidade de água prontamente disponível (potencial matricial compreendido entre -6 kPa e -100 kPa) na camada de 0-20 cm, quando comparado com a camada de 20-40 cm, evidenciando que a compactação superficial no plantio direto afetou negativamente a condição hídrica do solo na camada de 0-20 cm.

A água é a principal responsável pelas flutuações na produção das culturas (Ritchie, 1981), principalmente em lavouras não irrigadas e em regiões que apresentam “veranicos”. A resposta econômica das plantas ao déficit hídrico é um processo dinâmico e, geralmente, é difícil estabelecer relações quantitativas (Ritchie, 1981). Por isso, devemos priorizar práticas de manejo de solo ou manejo de culturas, tais como manter cobertura permanente do solo, terraços de contenção, utilizar plantas recuperadoras da estrutura do solo e plantas descompactadoras que proporcionam um melhor aproveitamento da água. O plantio direto e o preparo reduzido são eficientes em reduzir as perdas de água do solo por evaporação em virtude do efeito isolante térmico da cobertura morta depositada sobre o solo (Salton & Mielniczuk, 1995).

A compactação do solo limita a infiltração de água, ocasionando erosão ou empoçamento da água na superfície do solo. Muitos autores sugerem que a infiltração de água é o melhor indicador de compactação do solo (Diebold, 1953; White, 1992). Porém, no plantio direto a infiltração de água é facilitada por apresentar uma camada de palha protegendo a superfície contra o impacto das gotas de chuva, que evita o selamento superficial, e uma camada de palha parcialmente decomposta e parcialmente incorporada, que facilita a entrada da água no solo. A afirmação só é verdadeira se as condições de subsuperfície também forem adequadas para o movimento descendente da água no perfil, ou seja, não ocorram camadas de impedimento à passagem da água. Em preparo convencional, realizado de forma inadequado, forma-se uma camada subsuperficial de impedimento, tanto para o crescimento radicular como para a passagem da água da camada superficial para o interior do perfil. Nessas situações é comum a ocorrência de erosão do solo onde praticamente toda a camada mobilizada é removida da lavoura.

No plantio direto, camadas compactadas pelo tráfego de máquinas provocam redução na infiltração de água e no crescimento de raízes. Tais camadas são facilmente detectáveis por determinações com penetrógrafos ou pela densidade do solo. Lavouras cultivadas sob plantio direto apresentam, normalmente, maior resistência mecânica à penetração e maior densidade do solo na profundidade entre 8 cm e 12 cm (Carter et al., 1999; Correchel et al., 1999). O preparo e a compactação alteram o sistema poroso do solo e, conseqüentemente, afetam os processos hídricos nele ocorrentes.

Poderíamos inferir que camadas de maior densidade do solo ou maior resistência mecânica à penetração poderiam provocar conseqüências iguais às provocadas pelo pé-de-arado em preparo convencional. Contudo, devido à ausência de revolvimento, a estrutura do solo não é destruída e essa facilita a entrada e a passagem de água entre os macroagregados da superfície do solo para camadas mais profundas do perfil, além da presença de poros formados pela atividade biológica e pelo crescimento e decomposição de raízes.

A infiltração de água no solo é de difícil mensuração no campo, devido à sua alta variabilidade espacial e temporal (Brito et al., 1996). 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 plantio direto, além da palhada não decomposta na superfície, existe também uma fração de palha parcialmente decomposta, que interage com a superfície do solo. A combinação dessas, com uma rede de macroporos contínuos em profundidade, proporciona um aumento da infiltração de água no plantio direto quando comparado com o preparo convencional. Mas quando comparamos o plantio direto com a condição natural, verificamos que há um decréscimo na quantidade de água infiltrada no solo (Kertzmann, 1996; Klein, 1998). Kertzmann (1996), utilizando cilindros duplos concêntricos, em Latossolo Vermelho distrófico, encontrou que a taxa constante de infiltração em mata nativa foi de 1396 mm h^{-1} e na área com 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 plantio direto, houve uma drástica redução (mais de 20 vezes) da infiltração de água no solo, em função do manejo do plantio direto.

Um dos parâmetros mais importantes que influencia a condutividade hidráulica do solo é a continuidade dos poros e não apenas o volume de macroporos. Sauer et al. (1990), estudando propriedades hidráulicas do solo, observaram que a K_{sat} foi menor no preparo convencional do que no plantio direto, embora houvesse maior volume de macroporos no preparo convencional. A K_{sat} relacionou-se de maneira negativa com a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distrófico e em um planossolo (Beltrame et al., 1981).

Na maioria das condições dos solos agrícolas, o fluxo de água ocorre em condições de solo não saturado. Portanto, a K_{θ} possui grande importância na quantificação do movimento de água do solo para as raízes (Jong van Lier & Libardi, 1997).

A capacidade de armazenamento de água no solo tem um determinado limite que é determinado por características físicas do solo inerentes à sua composição e a fatores relacionados ao manejo. Quanto mais argiloso for o tipo de solo, maior quantidade de água ficará retida nele em comparação a solos menos argilosos. Porém, a maior quantidade de água armazenada muitas vezes não está disponível para as plantas, ou seja, o potencial matricial que essa água está adsorvida às partículas do solo é maior que a capacidade das plantas em extraí-la. Existe, portanto, diferença entre água armazenada no solo e água disponível para as plantas e nem todo o conteúdo de água no solo está disponível para as plantas, pois, no solo, existe uma proporção de poros de pequeno diâmetro que retém a água a tensões superiores à capacidade de extração pelas plantas. Tradicionalmente, tem-se considerado como água disponível a quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) (Veihmeyer & Hendrickson, 1949; Hillel, 1980, 1998). A capacidade de campo é a quantidade de água retida no solo após o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente, o que acontece entre 24 a 48 horas depois do solo estar completamente saturado, ou ainda, a quantidade de água retida nos potenciais de -33 kPa ou -10 kPa, determinada em amostras com estrutura preservada. Baseado nessa definição, a capacidade de campo refere-se a uma característica dinâmica do perfil de solo no que se refere à distribuição de água e não a uma característica intrínseca do solo (Reichardt, 1988). O ponto de murcha permanente é a quantidade de água no potencial de -1500 kPa, ou quando as plantas não conseguem recuperar a turgidez, mesmo em ambiente com 100 % de saturação atmosférica (Veihmeyer & Hendrickson, 1949; Hillel, 1980). Por considerar somente parâmetros de solo, esses índices têm sido motivos de várias contestações. Os principais argumentos sugerem que as plantas podem retirar água do solo submetida a potenciais menores que -1500 kPa e que, as plantas já estariam sentindo deficiência hídrica e restrição à sua produtividade em umidade do solo acima do ponto de murcha permanente.

A infiltração de água e a K_{sat} são reduzidas em função do aumento do estado de compactação, enquanto que a condutividade hidráulica em solo não saturado e a retenção de água no solo são maiores em função do aumento do estado de compactação. O objetivo deste estudo foi determinar a infiltração de água no solo, a condutividade hidráulica em solo saturado e em solo não saturado em diferentes estados de compactação sob plantio direto e estimar a capacidade de campo.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizaram-se os estados de compactação relacionados no capítulo 1, no Latossolo Vermelho distrófico, com 14 anos de plantio direto (Figura 7) e no Latossolo Vermelho distroférico típico, com 7 anos de plantio direto (Figura 8). No ano de 2000 adicionou-se o tratamento escarificado nos dois experimentos. A escarificação foi realizada utilizando equipamentos dos produtores das áreas experimentais, ambos eram modelo Jumbo, com seis hastes e a profundidade de trabalho foi em torno de 25 cm (Capítulo 1).

A composição granulométrica do solo foi determinada pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986), onde as amostras ficaram uma noite dispersando em NaOH a 6 % para a dispersão química e, após, dispersão mecânica em bateadeira por 15 minutos.

A condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) foi determinada em laboratório, utilizando amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de 5,36 cm de diâmetro por 3 cm de altura, em várias profundidades nos diferentes estados de compactação. Essas amostras foram saturadas em água durante 24 horas, a K_{sat} foi determinada coletando-se e medindo-se a quantidade de água percolada através da amostra de solo, mediante a aplicação de uma carga hidráulica constante de 2 cm de coluna d'água. Anotava-se o intervalo de tempo de coleta da água e repetia-se o procedimento até que o volume de água percolado no tempo tornava-se constante (EMBRAPA, 1997) e utilizou-se a equação 1 para calcular a K_{sat} das amostras.

$$K_{sat} = \frac{q * L}{A * H * t} \quad [3]$$

Onde, q = volume percolado em cm^3 quando o fluxo se tornou estável; L = altura da amostra de solo, em cm; A = área do cilindro em cm^2 ; H = altura da carga hidráulica; t = tempo em horas.

No campo, a condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) foi determinada utilizando o permeâmetro de carga constante de Guelph (Elrick et al., 1987). A metodologia consistiu em abrir um poço de 15 cm de profundidade com trado específico. Nesse poço eram aplicadas duas cargas hidráulicas, a primeira de 5 cm de coluna d'água e a segunda de 10 cm de coluna d'água. Em cada carga hidráulica eram realizadas leituras do nível do reservatório a cada dois minutos, até que a quantidade de água que infiltrava no solo por unidade de tempo se tornar constante. A K_{sat} , determinada no campo pelo permeâmetro de carga constante, foi calculada pela equação:

$$K_{sat} = (G_2 * Q_2) - (G_1 * Q_1) \quad [4]$$

Onde:

$$G_2 = H_1 C_2 / \pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)] \quad [5]$$

$$G_1 = G_2 [H_2 C_1] / [H_1 C_2] \quad [6]$$

$$Q_1 = (X)R_1$$

$$Q_2 = (X)R_2$$

E onde: a = raio do poço (cm);

H_1 = profundidade da primeira coluna de água (5 cm);

H_2 = profundidade da segunda coluna de água (10 cm);

C_1 e C_2 = fatores correspondentes à relação (H_1/a) e (H_2/a) , respectivamente;

X = área do reservatório ($22,696 \text{ cm}^2$).

a = raio do poço.

A infiltração de água no solo foi determinada pelo método dos anéis concêntricos, obtendo a taxa de infiltração de água e a infiltração básica para cada estado de compactação e classe de solo. Resumidamente, a metodologia dos anéis concêntricos consiste em inserir na superfície do solo dois anéis, um com 40 cm e outro com 20 cm de diâmetro, de maneira concêntrica. Em ambos cilindros, aplica-se e mantém-se uma lâmina constante de água na superfície do solo e anota-se o volume infiltrado no cilindro menor, até que o volume infiltrado se aproxime de um valor constante por unidade de tempo. Ajustou-se o modelo de Kostiakov para a lâmina infiltrada e para a taxa de infiltração inicial conforme as equações abaixo;

$$I = a * t^b \quad [7]$$

onde, "I" = lâmina infiltrada, "t" = tempo e "a" e "b" são parâmetros do modelo.

Derivando a equação acima,

$$i = c * t^{-b} \quad [8]$$

onde, i = taxa de infiltração.

$$c = a * b$$

No Latossolo Vermelho distrófico, em Cruz Alta, determinou-se a condutividade hidráulica não saturada (K_{θ}) pela metodologia do perfil instantâneo (Hillel et al., 1972). Utilizaram-se tábuas para delimitar as parcelas a serem inundadas e manteve-se uma lâmina de água de aproximadamente 5 cm em toda a parcela controle. Em cada estado de compactação e na área escarificada foi inundada uma área de 1,2 m² durante cinco dias. Cobriram-se as parcelas controle com lona plástica e depois de cessada a inundaçã, determinou-se a umidade volumétrica do solo e o potencial matricial no primeiro minuto após a lâmina de água desaparecer da superfície do solo até 20 dias após o início da drenagem.

Tensiômetros foram instalados nas profundidades de 10 cm; 20 cm; 35 cm; 50 cm; 75 cm e 100 cm. As leituras do potencial total do solo foram realizadas com tensímetro digital. O potencial matricial foi calculado diminuindo da leitura do tensímetro a altura do tensiômetro. Determinou-se a umidade volumétrica do solo com TDR nas profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm; 20-35 cm e 35-50 cm e com sonda de nêutrons nas profundidades de 50-75 cm e 75-100 cm.

Amostras com estrutura preservada e com estrutura alterada foram coletadas nas profundidades de 1-4 cm, 5-8 cm, 10-13 cm, 15-18 cm, 20-13 cm, 35-38 cm, 50-53 cm, 75-78 cm e 100-103 cm no Latossolo Vermelho distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico típico.

A curva característica de água no solo foi determinada de duas maneiras: (i) com amostras com estrutura preservada nos potenciais de – 1 kPa; -2 kPa; -4 kPa e – 6 kPa em mesa de tensão e, - 10 kPa e – 33 kPa em membrana de Richards. (ii) amostras com estrutura alterada, em amplitude de potencial de –10 kPa a –3000 kPa, determinadas em potenciômetro de ponto de orvalho. Com os valores da umidade volumétrica do solo e o potencial matricial, ajustou-se equação de van Genuchten (van Genuchten, 1980)

$$\Theta = \Theta_r + \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad [9]$$

Onde; Θ = umidade volumétrica; Θ_r = umidade volumétrica na tensão de 1500 KPa; Θ_s = umidade volumétrica do solo saturado; Ψ_m = potencial mátrico da água no solo; α , m , n = parâmetros empíricos de ajuste da equação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Granulométrica do solo.

A composição granulométrica do solo é uma característica inerente ao solo que possui grande importância no estudo do seu comportamento físico-

hídrico. Vários fatores físico-hídricos do solo são influenciados pelo teor de argila do solo, tais como, o estado de energia da água no solo, o fluxo não saturado, porosidade e densidade do solo.

O resultado da análise granulométrica mostrou que o Latossolo Vermelho distrófico apresenta um incremento de argila em profundidade (Figura 21). O maior teor de argila encontrado na camada superficial foi para o local onde se localiza o menor estado de compactação. Nesse local, o teor de argila é superior a 60 % já na camada de 10 a 20 cm, enquanto que, nos demais tratamentos, o teor de argila fica próximo de 55 %. Em todas as situações, o aumento de argila da camada superficial para as maiores profundidades foi de 30 unidades percentuais de argila. Resultados semelhantes foram verificados por Machado et al. (1981), nesse mesmo tipo de solo.

O Latossolo Vermelho distroférico típico possui uma quantidade maior de argila, porém a distribuição dos teores de argila no perfil de solo é mais homogênea (Figura 22). Em geral, na camada de 0 a 20 cm, o teor de argila ficou em torno de 60 % e na camada próxima de 50 cm, em 70 %.

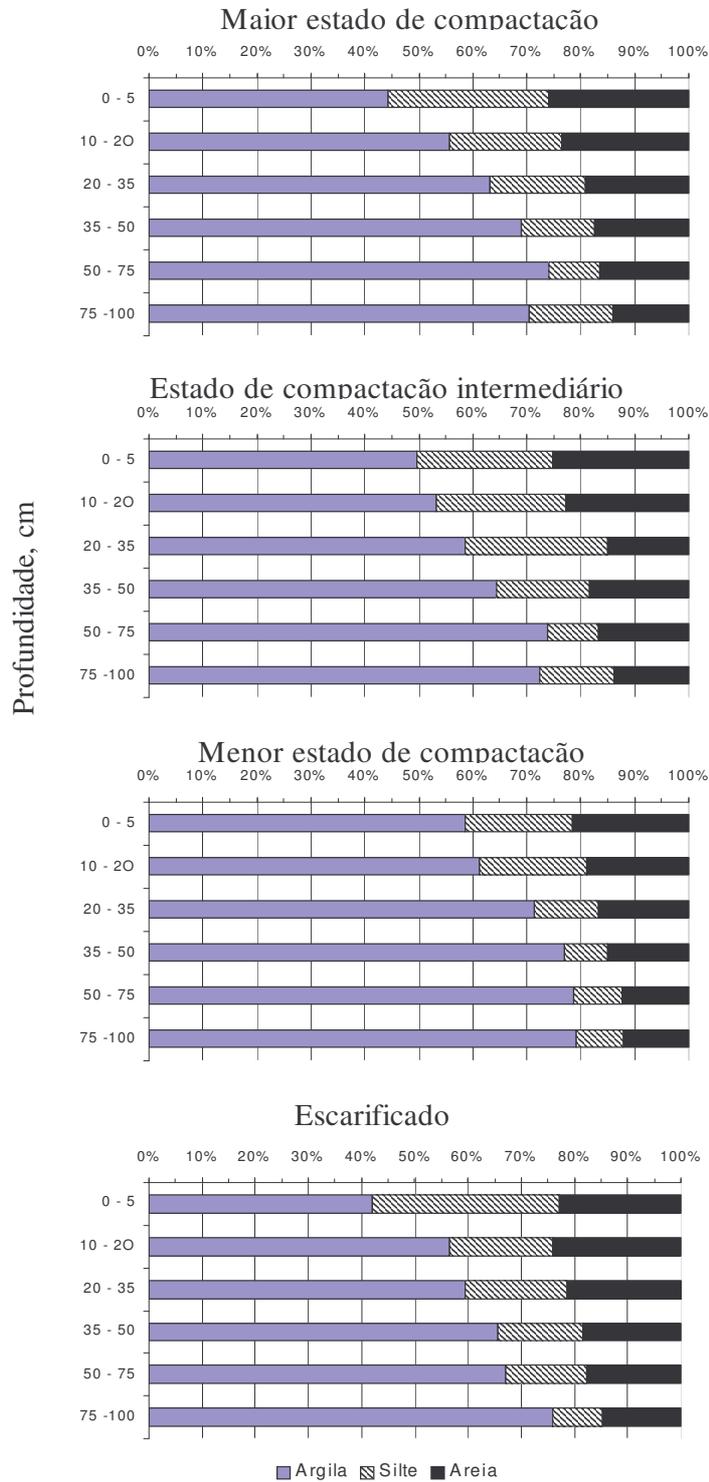


FIGURA 21. Valores da análise granulométrica do Latossolo Vermelho distrófico.

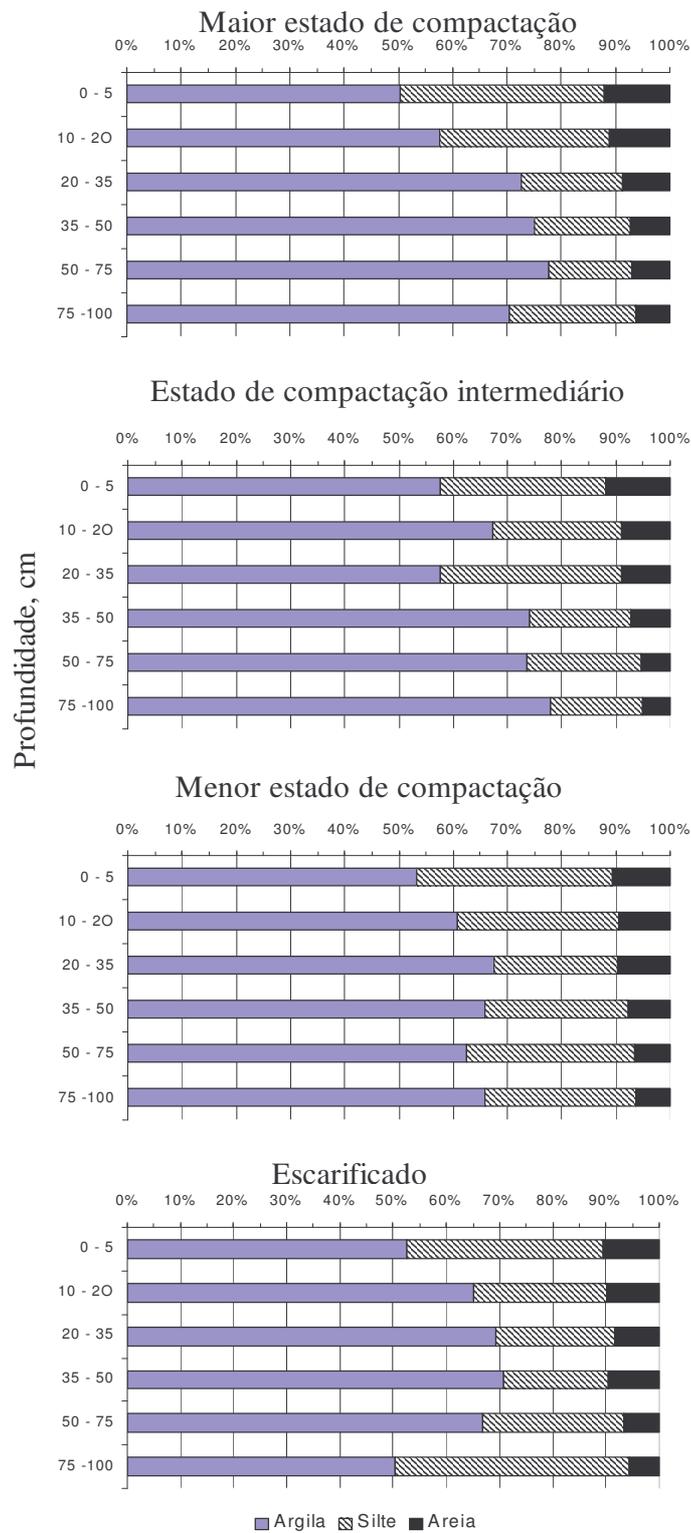


FIGURA 22. Valores da análise granulométrica do Latossolo Vermelho distroférico típico.

Infiltração de água no solo

Os resultados da capacidade de infiltração de água no solo mostraram diferenças entre os dois tipos de solos, ocasionados, principalmente, pelo teor de argila, manejo, tempo de implantação do plantio direto e rotação de culturas. Entre os estados de compactação não se encontraram diferenças na taxa de infiltração de água, apesar dos diferentes valores de densidade do solo e resistência à penetração verificados entre os estados de compactação (Capítulos 1 e 4); por isso, ajustou um único modelo para a taxa de infiltração em cada tipo de solo. O modelo de Kostiakov ajustou satisfatoriamente aos valores da taxa de infiltração de água no solo no tempo, com valores de coeficiente de determinação de 0,91 para o Latossolo Vermelho distrófico e de 0,87 para o Latossolo Vermelho distroférico típico (Figura 23).

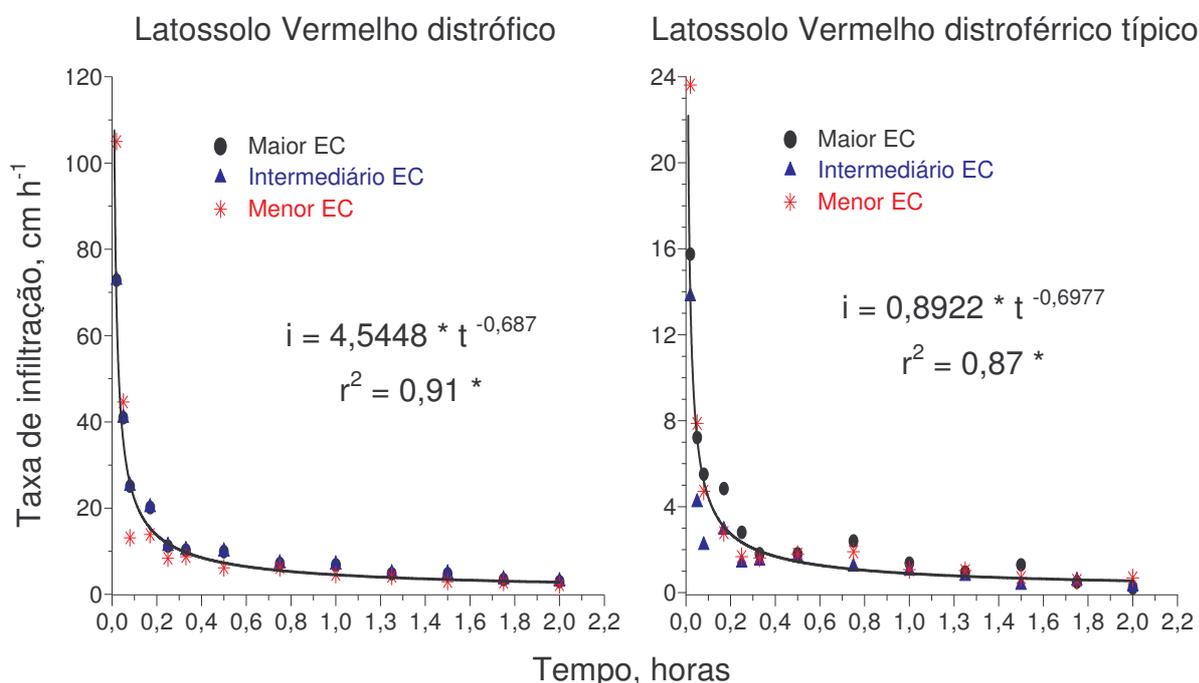


FIGURA 23. Taxa de infiltração no tempo nos diferentes estados de compactação, para o Latossolo Vermelho Distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico típico. Média de 6 repetições, * significativa a 5% de probabilidade.

No Latossolo Vermelho distrófico, a maior taxa de infiltração inicial ocorreu no intermediário EC, em torno de 105 cm h^{-1} e os demais estados de compactação em torno de 70 cm h^{-1} , porém a taxa constante de infiltração foi semelhante entre os estados de compactação, em torno de 3 cm h^{-1} .

No Latossolo Vermelho distroférico típico, a taxa de infiltração constante não diferiu entre os estados de compactação, apresentando valores em torno de $0,39 \text{ cm h}^{-1}$. Klein (1998) verificou maiores valores de taxa constante de infiltração para a condição de plantio direto sem irrigação ($4,5 \text{ cm h}^{-1}$) do que na condição de plantio direto com irrigação ($7,3 \text{ cm h}^{-1}$) na camada superficial.

No Latossolo Vermelho distrófico, onde a área esteve há mais tempo sob plantio direto e com rotação de culturas, a infiltração inicial de água foi 4 vezes maior que no Latossolo Vermelho distroférico típico (Figura 23), indicando efeito benéfico da rotação de culturas na infiltração de água no solo, mesmo em condições de alta densidade do solo e resistência à penetração.

O efeito da rotação de culturas no aumento da infiltração de água e melhoria das condições físicas do solo é amplamente reconhecida. Estudando a infiltração de água no solo com chuva natural, Abreu (2000) verificou maior infiltração nas parcelas que receberam a rotação com *Crotalaria spectabilis* do que nas parcelas com plantio direto contínuo de soja e nas parcelas com escarificação.

Assim como para a taxa de infiltração básica, a lâmina de água infiltrada não diferiu entre os estados de compactação nos dois tipos de solos (Figura 24), por isto, ajustou-se uma única equação para os estados de compactação em cada tipo de solo. No Latossolo Vermelho distrófico a lâmina infiltrada foi de aproximadamente 45 cm e no Latossolo Vermelho distroférico típico, foi de aproximadamente 10 cm, no período de duas horas.

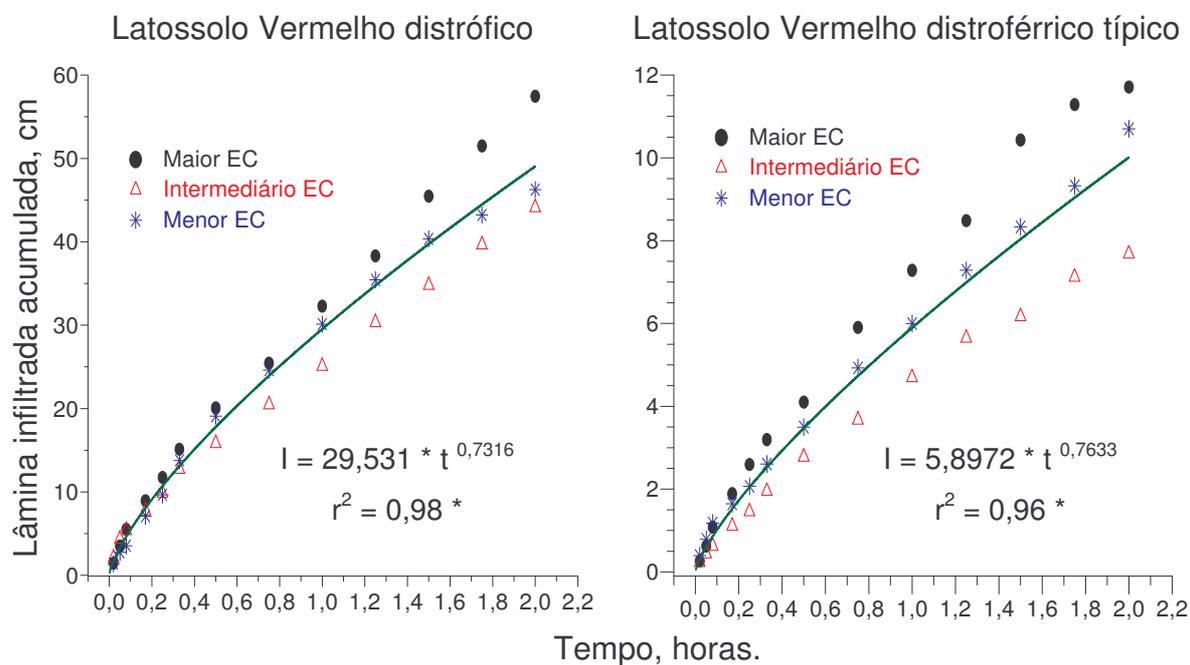


FIGURA 24. Lâmina infiltrada acumulada nos diferentes estados de compactação. Média de 6 repetições. * significativo a 5 % de probabilidade.

Condutividade hidráulica em solo saturado e em solo não saturado

A camada superficial do Latossolo Vermelho distrófico apresentou altos valores de K_{sat} (Tabela 5), embora inferiores que os valores de K_{sat} observados por Klein (1998) em um Latossolo Vermelho de Guáira-SP. Na superfície, o efeito da atividade biológica, raízes, matéria orgânica, estrutura e pequeno revolvimento pelos discos ou sulcadores da semeadora diminuem os efeitos da compactação.

Na camada de 10-13 cm os valores de K_{sat} foram reduzidos em 5 vezes em comparação à camada superficial no maior estado de compactação e diminuição da K_{sat} também foram verificados nos demais estados de compactação. Klein (1998) verificou redução da K_{sat} na profundidade de 10 cm

de 82 cm h⁻¹, na condição de mata natural, para 5,4 cm h⁻¹, na condição de plantio direto cultivado intensivamente sob pivô central.

Para uma adequada infiltração de água em profundidade, é importante que o perfil de solo não apresente camadas de impedimento a passagem da água, pois a taxa de infiltração de água está condicionada pela K_{sat} da camada de maior impedimento, retardando o processo de infiltração de água no solo, principalmente se essa camada estiver próxima da superfície. Beltrame et al. (1981) verificaram que, uma camada compactada na profundidade entre 20 cm e 30 cm, reduziu a K_{sat} em 5 vezes, implicando em maior tempo para drenagem do excesso de água, provocando encharcamento do solo por um período mais longo e reduzindo o tempo disponível para executar operações agrícolas num planossolo.

O tratamento escarificado apresentou altos valores de K_{sat} até a profundidade de 23 cm; após, os valores foram semelhantes aos demais estados de compactação. O revolvimento provocado pelo escarificador alterou a estrutura do solo e aumentou a macroporosidade, o que facilitou a drenagem.

TABELA 5. Valores de condutividade hidráulica em solo saturado (cm h⁻¹) determinada em laboratório, para distintas profundidades em três estados de compactação.

Estado de compactação	Profundidade (cm)								
	1-4	7-10	10-13	15-18	20-23	35-38	50-53	75-78	100-103
-----Latossolo Vermelho distrófico, cm h ⁻¹ -----									
Maior	30,7*	20,5	4,22	3,30	2,50	9,57	1,30	1,43	1,93
Intermediário	16,5	3,46	6,87	1,53	16,98	6,04	2,82	4,62	2,29
Menor	22,4	23,6	12,23	9,86	1,65	8,42	7,00	3,79	10,41
Escarificado	38,8	54,6	----	69,95	106,7	8,61	5,59	1,32	0,97
-----Latossolo Vermelho distroférico típico, cm h ⁻¹ -----									
Maior	58,5	3,71	7,11	8,10	2,68	8,01	5,80	16,29	**--
Intermediário	23,3	10,8	3,47	4,98	7,27	3,38	5,94	2,98	----
Menor	4,82	3,15	4,87	4,76	6,17	2,79	6,69	14,28	----
Escarificado	149	95,2	4,58	16,36	5,63	26,4	16,2	2,16	----

* média de três repetições, ** não determinado

Beltrame et al. (1981) ajustaram uma relação potencial negativa da K_{sat} com a D_s , indicando que a K_{sat} depende da porosidade e da estrutura do solo.

Testando diversos modelos de ajuste dos valores de K_{sat} e macroporosidade, verificamos que o modelo exponencial apresentou melhor ajuste (Figuras 25). Messing & Jarvis (1995) também verificaram relação exponencial e positiva da K_{sat} com a macroporosidade em amostras com estrutura preservada em um solo com 400 g kg^{-1} de argila, na Suécia.

Os valores de K_{sat} apresentaram grande variabilidade, como pode ser visualizado na dispersão dos valores e nos valores do coeficiente de determinação. Klein (1998) verificou que o coeficiente de variação para a K_{sat} foi de aproximadamente 50 %.

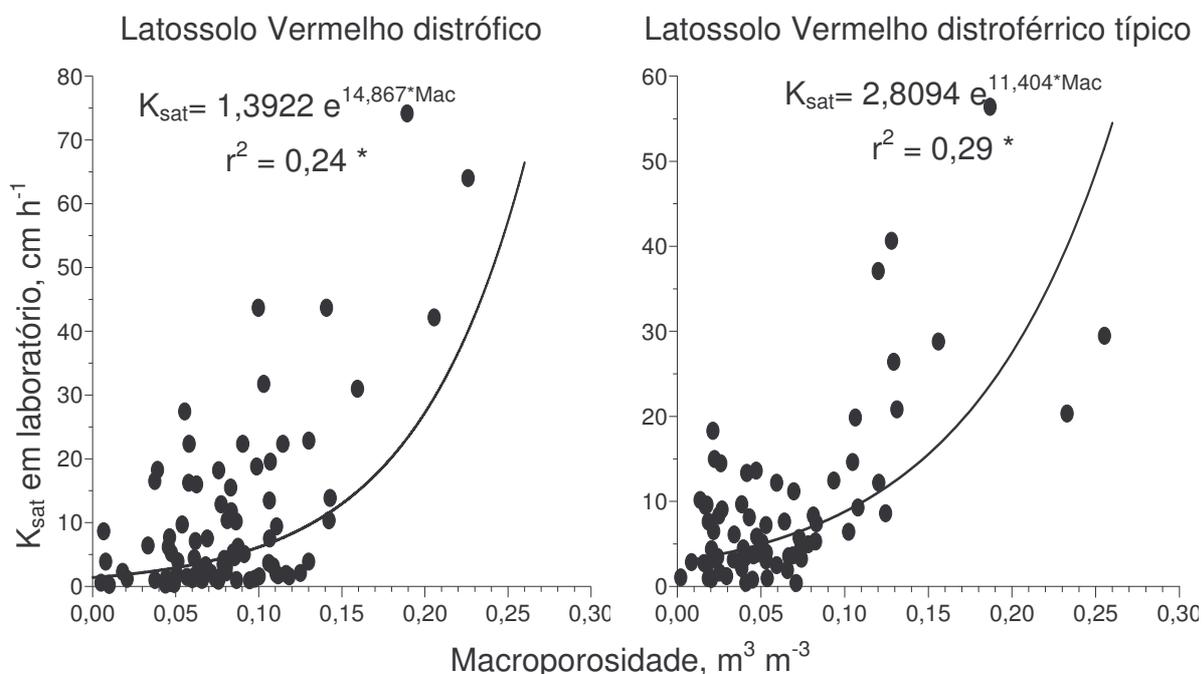


FIGURA 25. Relação entre a condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}) determinada em laboratório e a macroporosidade do solo nos diferentes estados de compactação e na área escarificada. * significativo a 5% de probabilidade.

Da mesma forma que a infiltração de água no solo, a K_{sat} no campo foi bastante superior, em torno de 5 vezes, no Latossolo Vermelho distrófico em relação ao Latossolo Vermelho distroférico típico, em todos os estados de compactação (Tabela 6). Porém, ao contrário da infiltração, a K_{sat} foi diferente

entre os estados de compactação no Latossolo Vermelho distrófico e, em virtude do alto coeficiente de variação, a K_{sat} no campo para o Latossolo Vermelho distroférico típico foi estatisticamente semelhante.

No dois Latossolos, a K_{sat} no maior EC foi cerca de 3 vezes menor que a K_{sat} no menor EC. No Latossolo Vermelho distrófico, o maior EC apresentou valor de K_{sat} de $9,18 \text{ cm h}^{-1}$, enquanto que no menor EC o valor de K_{sat} foi de $26,7 \text{ cm h}^{-1}$. No Latossolo Vermelho distroférico típico, a K_{sat} no campo no maior EC foi de $1,88 \text{ cm h}^{-1}$ e, no menor EC, o valor da K_{sat} a campo foi de $5,16 \text{ cm h}^{-1}$.

Estudando sistemas de rotação de cultura em Latossolo Vermelho distroférico típico sob plantio direto, Genro Jr. (2002) determinou valores de K_{sat} variando de $0,25 \text{ cm h}^{-1}$ a $1,63 \text{ cm h}^{-1}$, próximo de 10 vezes inferior aos valores de K_{sat} determinados para esse tipo de solo neste estudo. Em Argissolo Vermelho Amarelo, Abreu (2000) verificou que a K_{sat} no campo foi maior nas parcelas que receberam a rotação com *Crotalaria spectabilis* do que no plantio direto sem rotação e no tratamento com escarificação.

TABELA 6. Valores de condutividade hidráulica em solo saturado no campo (K_{sat} em cm h^{-1}), em dois Latossolos sob plantio direto. Médias de 6 repetições.

Estado de compactação	Latossolo Vermelho distrófico	Latossolo Vermelho distróférico típico
	-----cm h ⁻¹ -----	
Maior	9,18 b	1,88 a
Intermediário	17,57 ab	3,89 a
Menor	26,76 a	5,16 a
Coeficiente de variação (%)	35	115

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste DMS ($P < 5 \%$).

A quantificação da redistribuição de água no solo utilizando o método do perfil instantâneo (Hillel et al., 1972) foi realizada somente no Latossolo Vermelho distrófico. O tempo de drenagem foi de 480 horas (20 dias) e o valor da umidade do solo na capacidade de campo (CC) foi considerada a umidade volumétrica do solo 24 horas após o início da drenagem (Figura 26). Este

tempo de drenagem foi suficiente para cessar a rápida infiltração de água que ocorre nas primeiras horas após a drenagem.

Na profundidade de 10 cm, a umidade do solo na capacidade de campo foi de $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no maior EC, $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no intermediário EC, $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no menor EC e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no escarificado. Devido ao incremento de argila em profundidade neste tipo de solo e, as condições de impedimento ao fluxo de água nas maiores profundidades, os valores da umidade do solo na capacidade de campo aumentaram ao longo do perfil.

A capacidade de campo, quando a infiltração de água no solo no tempo tenha reduzido para valores pequenos (Reichardt, 1988), foi em torno de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, variando para menos na superfície do solo e na área com menor densidade do solo e para mais, em profundidade onde aumenta o teor de argila neste solo. Tais resultados concordam com o observado por Souza & Reichardt (1996), que verificaram que os valores de umidade na CC variavam com a profundidade no solo, dependendo da quantidade de água armazenada e textura nas diferentes profundidades estudadas pelos autores.

Neste estudo, a capacidade de campo foi considerada a umidade volumétrica do solo 24 horas após o início da drenagem (Figura 26). Discordando de Klein (1998), que considerou a capacidade de campo o conteúdo de água de 48 horas após o início da drenagem em um Latossolo Vermelho de Guáira, SP. Uma característica dos latossolos é a sua grande microagregação, principalmente, os latossolos da região central do Brasil, que lhes confere uma característica similar a um solo franco arenoso (Klein, 1998).

A umidade volumétrica do solo determinada durante o primeiro minuto após a lâmina de água desaparecer da superfície do solo foi de aproximadamente $0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no maior e no intermediário EC, de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no menor EC e de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na área escarificada (Figura 27). Visualizou-se rápido decréscimo da água armazenada no solo após o primeiro minuto de drenagem até a determinação realizada 12 horas após e, a partir desse tempo de drenagem, a redução da umidade do solo foi lenta.

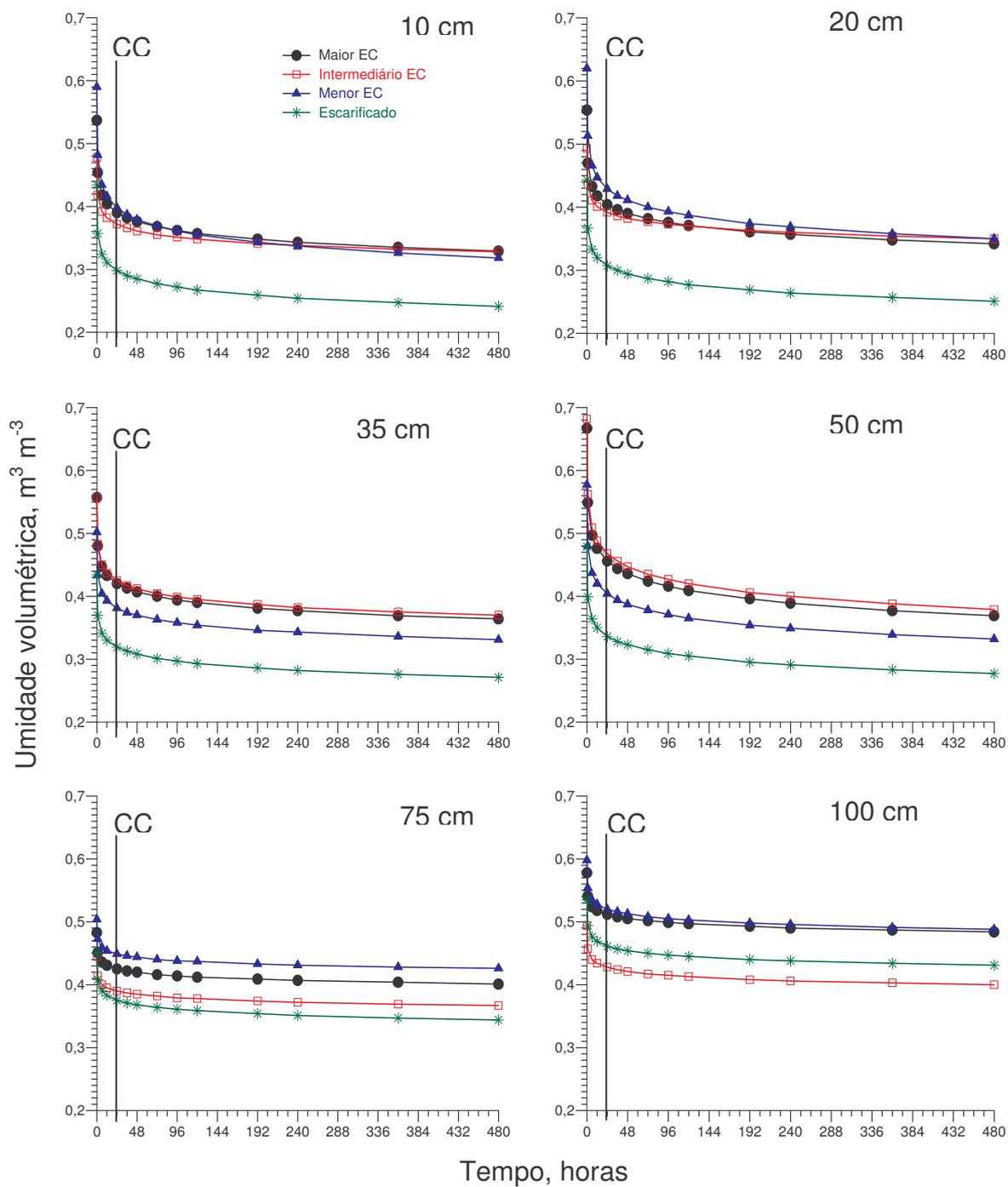


FIGURA 26. Valores de umidade volumétrica em função do tempo de drenagem. Linha vertical indica a umidade na capacidade de campo, 24 horas após o início da drenagem, no Latossolo Vermelho distrófico.

Durante todo o tempo de monitoramento da umidade do solo, os sistemas com plantio direto apresentaram maior umidade do que o tratamento com escarificação do solo. O menor armazenamento de água na condição de solo escarificado está relacionado com a diminuição da D_s e aumento da macroporosidade provocado pelo revolvimento. Nos macroporos, a retenção capilar de água é muito pequena e a água rapidamente é perdida para camadas mais profundas do perfil. Azooz et al. (1996) também encontraram menor armazenamento de água em solo revolvido, quando comparado com o plantio direto.

O potencial matricial do solo nas primeiras horas após o início da drenagem foi pequeno, em torno de $-2,5$ kPa (Figura 28). Após 48 horas de drenagem, os valores do potencial matricial tornaram-se mais negativos em todos os estados de compactação em grandes variações entre as profundidades no mesmo estado de compactação. Analisando a figura 27 e a figura 28, percebe-se que os valores de umidade volumétrica são rapidamente (12 horas) reduzidos, enquanto que, a resposta da diminuição da umidade no potencial matricial ocorre após 48 horas do início da drenagem.

Ajustaram-se equações do tipo exponencial e positiva entre a K_θ e a umidade volumétrica do solo (Figura 29), obtendo-se valores do coeficiente de determinação maiores que 0,87 (ANEXO E), indicando um bom ajuste dos dados à equação.

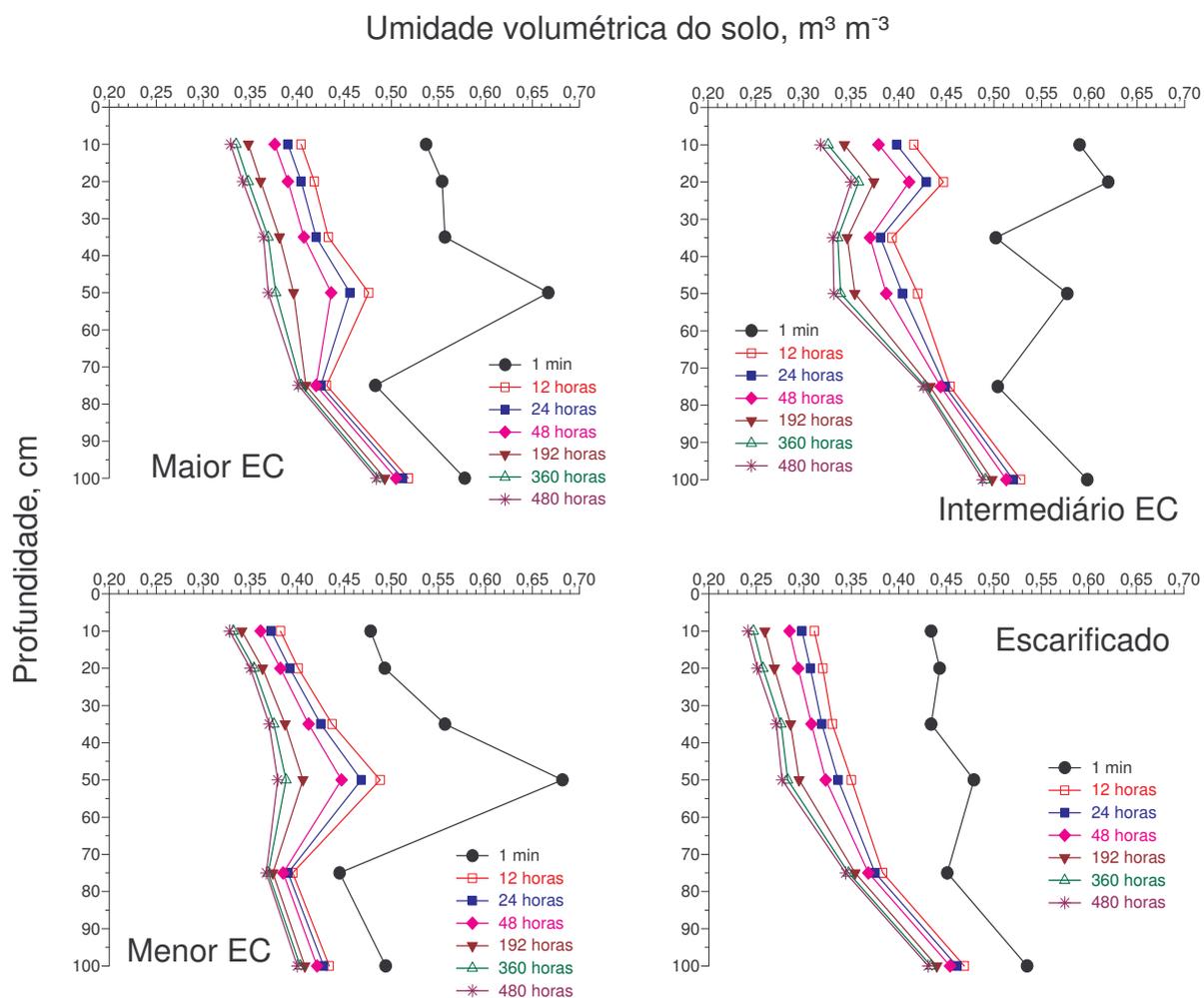


FIGURA 27. Valores da umidade volumétrica do solo durante a redistribuição de água no solo com maior, intermediário e menor estado de compactação em plantio direto e no tratamento escarificado.

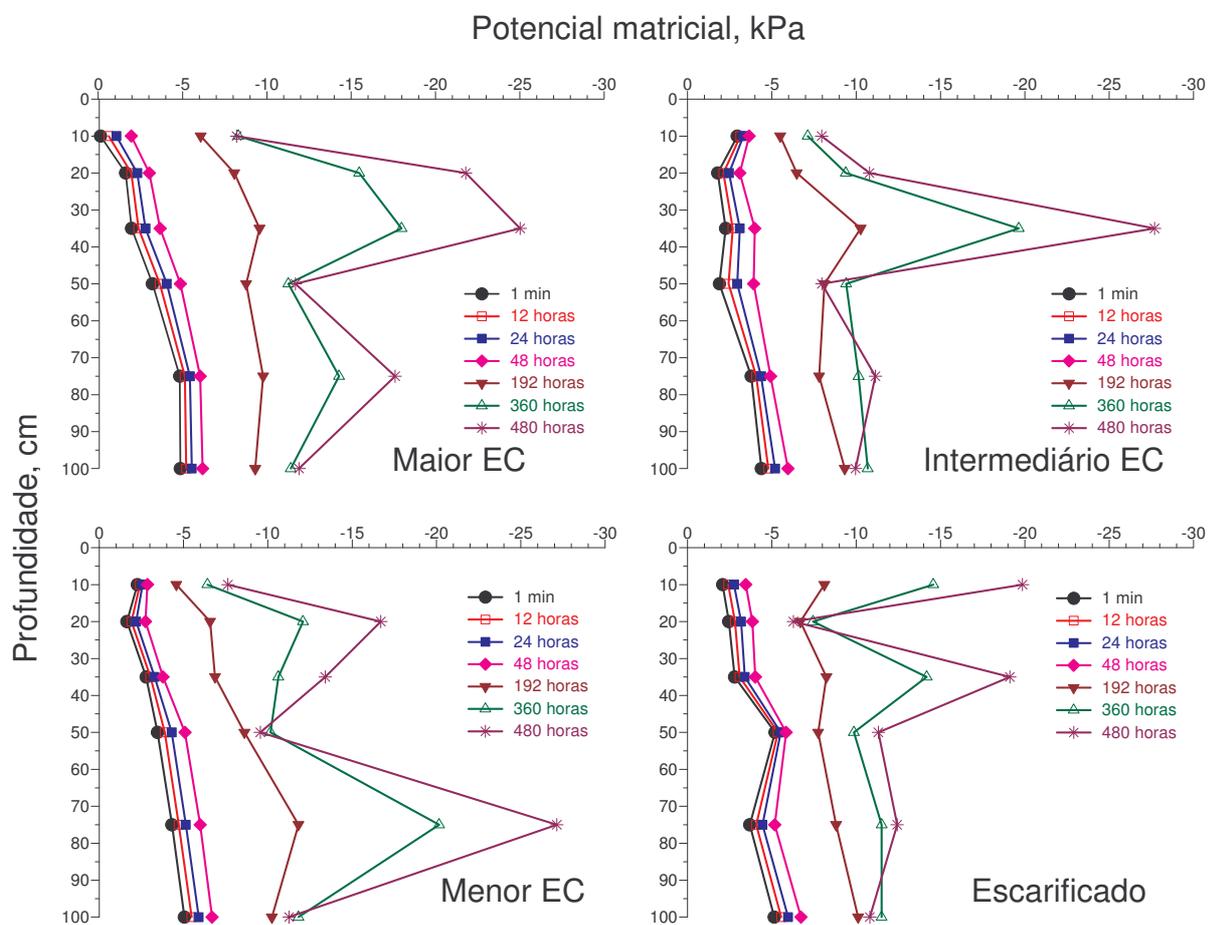


FIGURA 28. Valores do potencial matricial durante a redistribuição de água no solo com maior, intermediário e menor estado de compactação sob plantio direto e no tratamento escarificado.

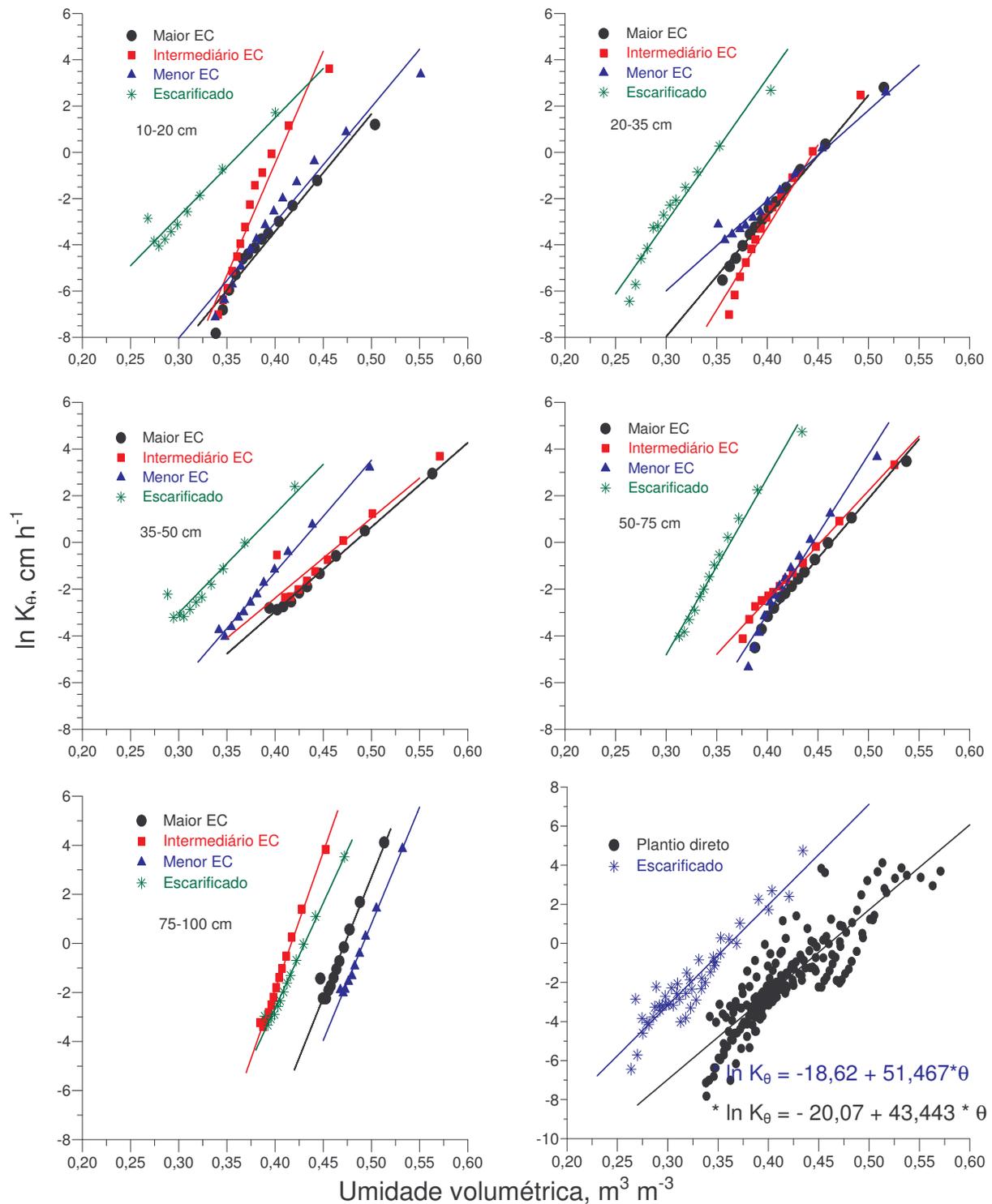


FIGURA 29. Condutividade hidráulica em solo não saturado em função da umidade volumétrica do solo em diferentes profundidades, em três estados de compactação e na área escarificada.

Os resultados da K_{θ} para os estados de compactação no plantio direto foram similares em todas as profundidades, diferindo apenas para a condição da área que recebeu escarificação. Considerando todas as profundidades em todos os estados de compactação e relacionando com o somatório da K_{θ} das profundidades na área escarificada, percebe-se maior K_{θ} na área escarificada do que no plantio direto para uma mesma condição de umidade no solo.

Para o mesmo tempo de drenagem e na mesma profundidade, Klein (1998) verificou que a K_{θ} no tratamento em que o solo era cultivado intensivamente foi menor que a K_{θ} na situação de solo com mata, mesmo o tratamento cultivado intensivamente apresentando maior umidade do solo. O autor concluiu que a K_{θ} é afetada pelo aumento da D_s em função da diminuição da porosidade e alteração na distribuição e continuidade dos poros. Azooz et al. (1996) verificaram maior K_{θ} no plantio direto do que no preparo convencional em um solo arenoso do Canadá, o que foi atribuído ao maior volume de poros com diâmetro menor que $7,5 \mu\text{m}$, que conduzem água mais rápido através do gradiente de potencial matricial do que poros de maior diâmetro.

Retenção de água no solo e capacidade de campo

Ajustou-se o modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980) nos valores da retenção de água no solo (Figura 30). Estão apresentadas somente as profundidades que houveram maior influência do estado de compactação nos valores de densidade do solo.

Visualizando o traçado das curvas de retenção de água, não houve diferenças entre a quantidade de água armazenada nos diferentes estados de compactação e também com a área escarificada nos dois latossolos (Figuras 30 e 31), refutando a hipótese de que havia maior quantidade de água armazenada no maior estado de compactação. Klein (1998), utilizando câmeras de Richards na determinação da curva característica de água no solo,

verificou que o uso e o manejo do solo alteraram o traçado das curvas de retenção de água em função da redução da porosidade e na distribuição de poros até a profundidade até 40 cm.

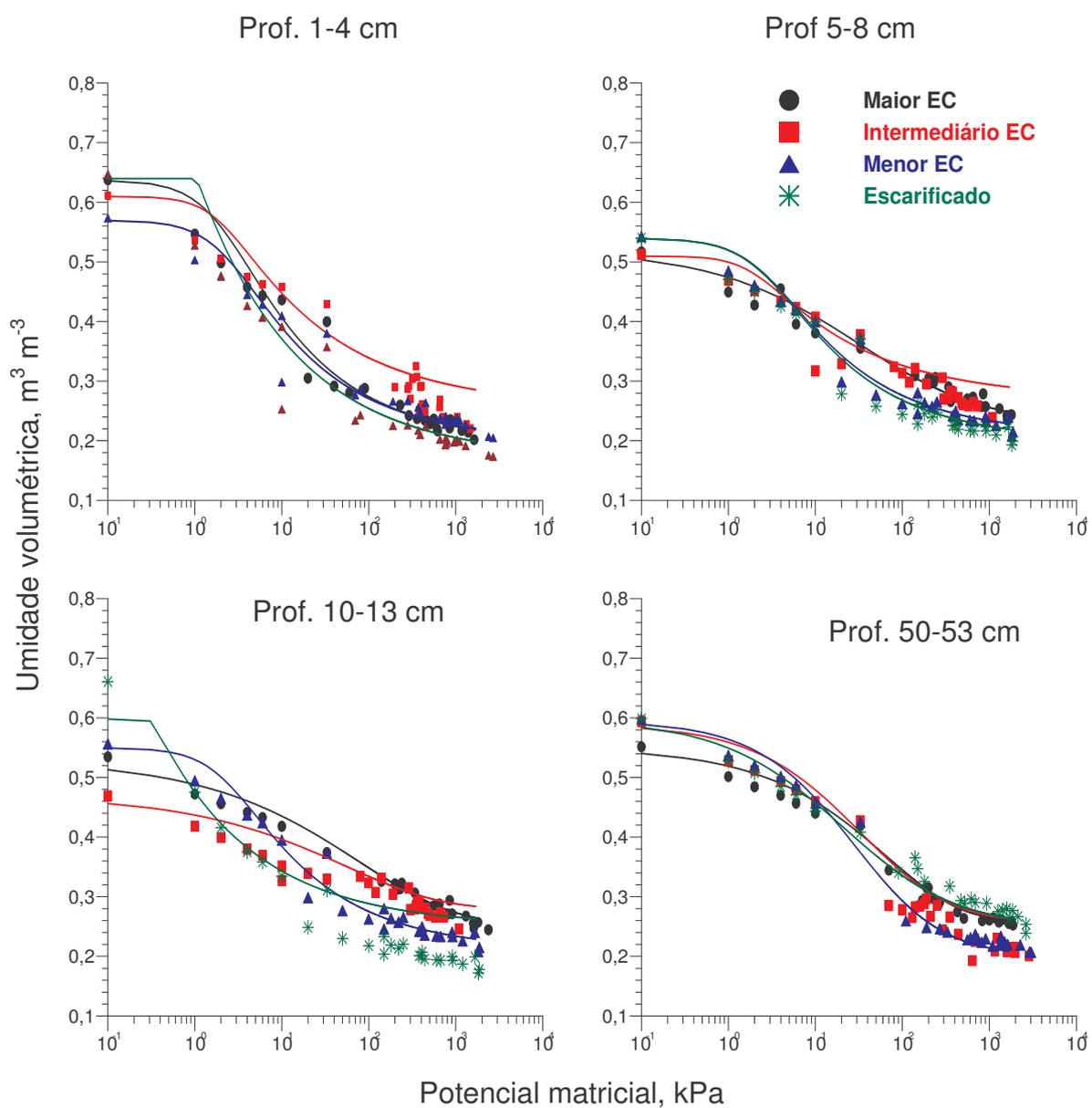


FIGURA 30. Curva de retenção de água e ajuste do modelo de Van Genuchten, no Latossolo Vermelho distrófico.

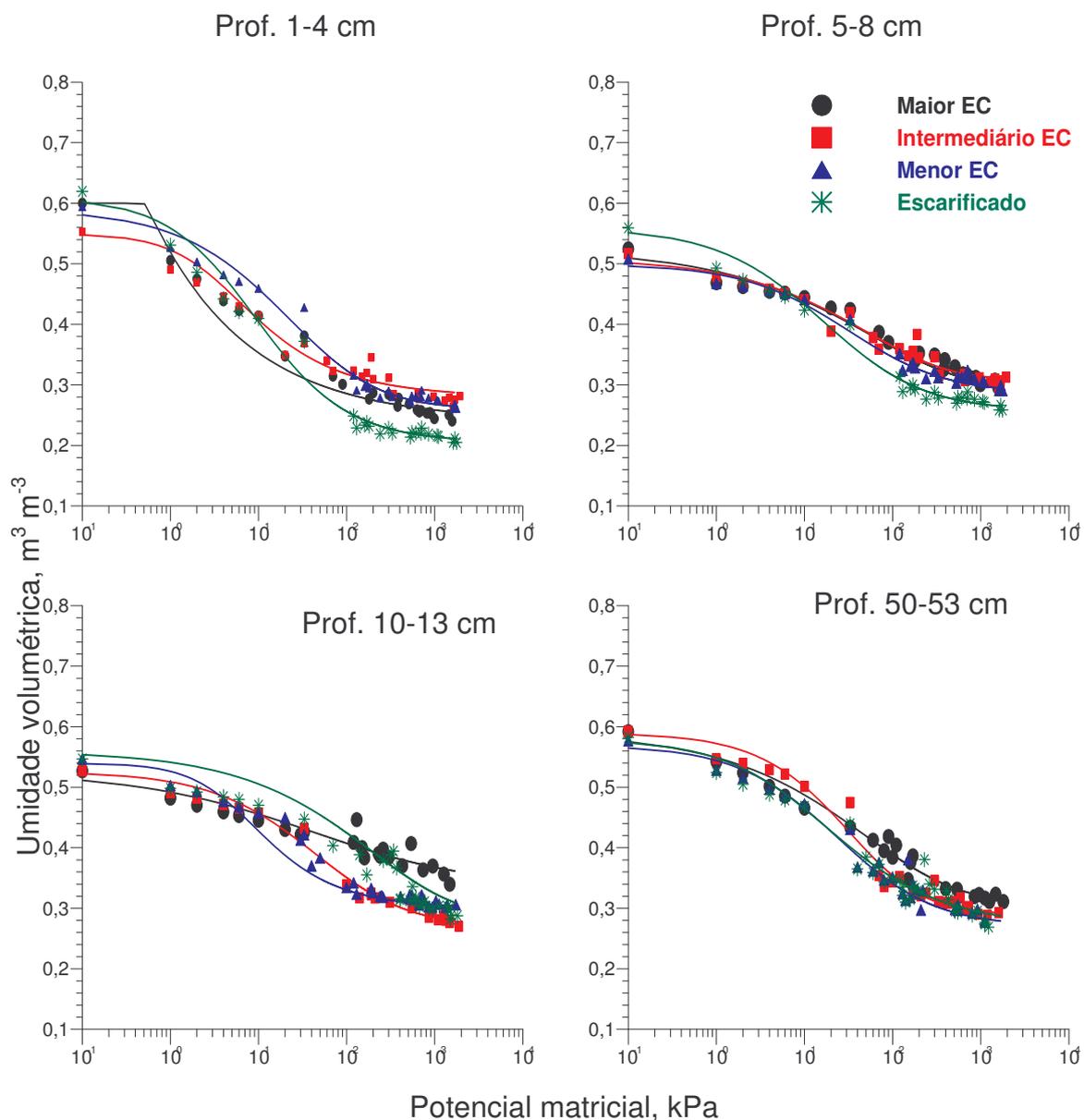


FIGURA 31. Curva de retenção de água e ajuste do modelo de Van Genuchten, no Latossolo Vermelho distroférico típico.

A determinação da capacidade de campo em laboratório, relacionando à quantidade de água armazenada na tensão de 10 kPa, para solo argiloso (Ritchie, 1981), tem sido muito utilizada devido à sua facilidade de determinação e rapidez na obtenção dos resultados, ao contrário da determinação no campo. Nota-se que a estimativa da capacidade de campo

em laboratório, na tensão de 10 kPa, apresentou valores de umidade volumétrica do solo similares aos obtidos diretamente no campo, após 24 horas de drenagem (Tabela 7).

TABELA 7. Valores da umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) do solo 24 horas após o início da drenagem comparadas com a umidade obtida nas curvas de retenção de água (CRA) na tensão de -10 kPa.

Prof.	Maior EC		Intermediário EC		Menor EC		Escarificado	
	Campo	CRA*	campo	CRA	campo	CRA	campo	CRA
10 cm	0,39	0,38	0,37	0,37	0,40	0,40	0,30	0,33
20 cm	0,40	0,40	0,39	0,40	0,43	0,44	0,31	0,36
35 cm	0,42	0,42	0,43	0,43	0,38	0,42	0,32	0,43
50 cm	0,46	0,43	0,47	0,44	0,40	0,44	0,34	0,43
75 cm	0,43	0,46	0,39	0,41	0,45	0,45	0,38	0,44
100 cm	0,51	0,49	0,43	0,48	0,52	0,47	0,46	0,51

$$* \text{ modelo: } \Theta = \Theta_r + \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m}$$

Na camada de 10 e 20 cm, os valores da umidade volumétrica estimada em laboratório pela equação de van Genuchten foi melhor relacionada com os valores obtidos à campo do que nas demais profundidades.

CONCLUSÕES

A condutividade hidráulica em solo saturado determinada no campo foi um índice que mostrou diferenças entre os estados de compactação em lavouras sob plantio direto. A condutividade hidráulica em solo saturado determinada em laboratório e a infiltração de água, determinada pelo método dos cilindros concêntricos, não foram eficientes em identificar diferenças entre os estados de compactação em lavouras sob plantio direto.

Para uma mesma condição de umidade volumétrica do solo, a condutividade hidráulica não saturada foi maior na área com escarificação do que no plantio direto.

A capacidade de campo, determinada no campo, ocorreu 24 horas após o início da drenagem, no Latossolo Vermelho distrófico. O valor de umidade volumétrica na tensão de -10 kPa pode ser utilizada na estimação da capacidade de campo para o Latossolo Vermelho distrófico.

CAPÍTULO 4. QUALIDADE ESTRUTURAL DE DOIS LATOSSOLOS E PRODUÇÃO DE CULTURAS ANUAIS

RESUMO

A compactação do solo reduz a qualidade do solo, aumenta sua densidade e resistência à penetração e diminui a amplitude do conteúdo de água em que as condições físicas do solo não são limitantes à produtividade das culturas agrícolas. O objetivo deste estudo foi relacionar os estados de compactação identificados em lavouras sob plantio direto e em área escarificada, com algumas propriedades físicas do solo e produtividade de trigo, soja e milho em dois latossolos. Coletaram amostras indeformadas para a determinação da D_s , porosidade e distribuição do tamanho de poros, determinou-se no campo a resistência mecânica do solo à penetração e a produtividade de soja, milho e trigo. A resistência mecânica à penetração, a densidade do solo e a porosidade mostraram que a compactação do solo foi verificada na camada de 7,5 cm a 15 cm de profundidade nos dois tipos de solos. A resistência à penetração foi mais eficiente que a densidade do solo em identificar os estados de compactação e camadas compactadas. A estrutura da camada compactada possui aspecto maciço e laminar, indicativo de compactação provocado por tráfego de máquinas. A produtividade da cultura do trigo foi reduzida em 18 % no Latossolo Vermelho distrófico e em 34 % no Latossolo Vermelho distroférico típico no maior estado de compactação em relação ao menor estado de compactação. No milho a redução foi de 810 kg ha⁻¹ e 2780 kg ha⁻¹ na área com maior estado de compactação em relação à área que recebeu escarificação, no Latossolo Vermelho distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico, respectivamente. A produtividade da soja não se mostrou sensível aos diferentes estados de compactação.

INTRODUÇÃO

A adoção do plantio direto no sul do Brasil foi um grande avanço tecnológico das décadas de 80 e 90, principalmente no controle da erosão do solo (Johnson et al., 1984; Seganfredo et al., 1997). Além disso, destacam-se a maior atividade e diversidade biológica (Campos et al., 1995, Balota et al., 1998; Ehlers, et al., 1983), acúmulo de carbono orgânico no solo (Balota et al., 1998; Benjamim, 1993), redução de custos com máquinas de preparo do solo, diminuição da mão-de-obra necessária para os cultivos (Barum, 1999) e redução do consumo de combustíveis (Soane & Ouwerkerk, 1994).

Por outro lado, com a redução e ausência de revolvimento do solo, espera-se um aumento da densidade ou do estado de compactação provocado pelo tráfego de máquinas (Carter, 1988; Hakansson, et al., 1988; Reinert, 1990; Benjamin, 1993; Unger & Jones, 1998; Silva et al., 2000a; Silva et al., 2000b) e pela acomodação natural das partículas (Carvalho Jr. et al., 1998). Em uma mesma lavoura, a variabilidade espacial e temporal das propriedades físicas do solo provoca diferentes condições de estresse para as plantas. Essa variabilidade do estado de compactação é dependente das condições de umidade do solo e do sistema de tráfego das máquinas. Pouco se conhece sobre a influência do aumento da compactação na relação com os atributos físicos e hídricos do solo, e na relação desses com o desenvolvimento das plantas.

Nas plantas, a compactação do solo provoca, principalmente, redução do crescimento das raízes e redução de produtividade. 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, a qual foi limitante ao crescimento de raízes de trigo (Merotto & Mundstock, 1999). Estudos sobre os efeitos da compactação em camadas de solo compactadas em vasos nem sempre imitam o que as plantas percebem no campo, pois, devido às flutuações de umidade do solo, essa proporciona locais no solo com

menor resistência por onde as raízes das plantas podem se desenvolver e ultrapassar camadas compactadas (Taylor & Brar, 1991). Em um experimento em condições de campo, Silva et al. (2000c) verificaram que o milho cultivado em plantio direto apresentou, na profundidade de 0 a 40 cm, menor densidade de raízes (cm de raiz por cm^3 de solo) do que no preparo convencional de solo, enquanto que, na camada de zero a 10 cm, o plantio direto apresentou maior densidade de raízes. Porém, a produtividade de grãos não diferiu entre os sistemas, indicando atividade compensatória da menor densidade radicular no plantio direto ou durante o ciclo, não ocorreu estresse hídrico significativo.

No Brasil, os problemas de redução de produtividade em função do aumento da compactação do solo ainda são pouco conhecidos. Tal fato deve-se, em grande parte, ao histórico relativamente recente da agricultura mecanizada no Brasil. Com exceção dos estados do sul do Brasil e da região Sudeste, o aumento expressivo do plantio direto na região do centro-oeste do Brasil aconteceu no início dos anos 90. Porém, preocupações relativas à redução de produtividade em lavouras mecanizadas nos estados do sul do Brasil e na região do cerrado brasileiro são atribuídas à compactação do solo (Plataforma Plantio Direto, 2000).

Vários experimentos medindo e estimando os prejuízos provocados pela compactação do solo são relatados em todo o mundo. Em um solo argilo siltoso no Marrocos, a compactação subsuperficial reduziu a produtividade de trigo entre 12% e 23 % (Oussible & Crookston, 1987). Em um experimento de dois anos comparando diferentes sistemas de cultivo, Oussible & Crookston (1987) verificaram redução na produtividade de trigo de 32 % no primeiro ano e 63 % no segundo ano de experimento no tratamento sem revolvimento do solo. Essa diminuição na produtividade do trigo foi atribuída a uma menor disponibilidade hídrica no subsolo quando comparada com o tratamento que recebeu uma subsolagem antes da semeadura do trigo. Gaultney et al. (1982) observaram redução de 50 % na produtividade de milho num solo siltoso com o subsolo compactado e Voorhees et al. (1989) observaram redução de 30 % na produtividade de milho no tratamento com tráfego de uma carreta graneleira de

18 Mg por eixo, num solo siltoso. Nesmith et al. (1987) verificaram menor produção de trigo sob plantio direto comparado com o preparo do solo com subsolador. Os autores atribuíram essa menor produção de trigo no plantio direto à maior Ds, maior resistência mecânica à penetração e a menor porosidade de aeração no plantio direto.

Variações entre anos na resposta das plantas à compactação dependem das condições climáticas. Karunatilake et al. (2000) mediram maior produtividade de milho no preparo convencional de solo em um ano relativamente úmido, porém não verificaram diferenças de produtividade entre plantio direto e preparo convencional em um ano relativamente seco em um solo franco argiloso. Johnson et al. (1984) comentam que estudos do potencial de produção em diferentes sistemas de manejo do solo indicam que, em solos mal drenados e de climas temperados, o plantio direto tem menor produtividade relativa do que o preparo convencional. O contrário pode ser verificado em solos bem drenados e em climas tropicais, onde a umidade do solo pode limitar o crescimento e produção das plantas.

A macroporosidade é um dos principais indicadores das modificações estruturais do solo (Carter, 1988). Porém, é uma determinação pontual e não revela a condição do solo durante todo o desenvolvimento das plantas. A macroporosidade é formada pela união de agregados, principalmente pela atividade microbiana e crescimento de raízes que aproximam os agregados e os unem (Hillel, 1998). A redução de volume de poros maiores que 50 micrômetros é um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação do solo. 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), a qual, pode impedir o crescimento de raízes e, conseqüentemente, diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular.

Os limites críticos ao desenvolvimento de plantas são de difícil mensuração, pois variam de acordo com o tipo de planta e com as condições climáticas que ocorreram durante o seu desenvolvimento. Dessa forma,

persistem muitas dúvidas quanto a valores de D_s , macroporosidade, porosidade total e resistência mecânica à penetração limitante ao desenvolvimento e a produtividade das culturas.

A hipótese deste estudo fundamenta-se que o maior estado de compactação, avaliado pela RP, reduz a produtividade das plantas. O objetivo principal do estudo foi relacionar os estados de compactação identificados em lavouras sob plantio direto com algumas propriedades físicas do solo e produtividade de trigo, soja e milho.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se para este estudo um Latossolo Vermelho Distrófico, com aproximadamente 500 g kg^{-1} de argila na camada superficial, localizado no município de Cruz Alta, RS, na propriedade do Sr. Ulfried Arns. A área vinha sendo cultivada com sucessões de soja e milho, no verão, aveia+ervilhaca e trigo, no inverno, em plantio direto há aproximadamente 14 anos. O esquema de sucessão de culturas prevê que 50 % da área de verão seja cultivada com soja e 50% com milho e no inverno, a metade com trigo e a outra metade com aveia+ervilhaca. Utilizou-se também um Latossolo Vermelho Distroférrico, com aproximadamente 600 g kg^{-1} de argila na camada superficial, localizado no município de Coronel Barros, RS, na propriedade do Sr. Arnaldo Yank, cooperado da Cooperativa Regional Triticula Serrana Ltda. A área vinha sendo cultivada em plantio direto há aproximadamente 7 anos, com cultivo de soja no verão e aveia ou trigo no inverno. Neste local, o produtor não realizava rotação de soja com milho no verão, apenas no inverno, a sucessão de aveia e trigo era realizada anualmente.

O experimento iniciou-se em agosto de 1999, onde foram definidos os estados de compactação (EC), conforme metodologia descrita no capítulo 1. Foram selecionados três estados de compactação para cada local. No Latossolo Vermelho Distrófico, o maior estado de compactação apresentou valores de RP superiores a 2,76 MPa, o intermediário estado de compactação

apresentou valores de RP entre 2,23 a 2,75 MPa e o menor estado de compactação apresentou valores de RP menores que 2,22 MPa, na profundidade de 7,5 cm (Figura 8).

Para a situação do Latossolo Vermelho Distroférico típico, o maior estado de compactação apresentou valores de RP superiores a 2,11 MPa, o intermediário estado de compactação apresentou valores de RP entre 1,60 e 2,10 MPa, enquanto que o menor estado de compactação apresentou valores de RP menores que 1,59 MPa (Figura 9).

Em setembro de 2000 foi realizada uma escarificação de uma faixa ao lado da área experimental, nos dois tipos de solos, adicionando-se o tratamento com escarificação. Utilizou-se escarificadores dos proprietários das áreas, ambos possuíam cinco hastes espaçadas de 25 cm, modelo “jumbo”, e a profundidade de trabalho foi de aproximadamente 25 cm.

Foram realizadas coletas (cilindros de 5,36 cm de diâmetro por 3 cm de altura) para determinar a densidade de solo (Ds), porosidade total (PT), macro e microporosidade, em duas épocas. Na primeira época (novembro de 1999), coletaram-se amostras para a Ds e porosidades nas profundidades de 1-4 cm, 5-8 cm, 10-13 cm, 15-18 cm, 20-23 cm e 30-33 cm. Na segunda avaliação, realizada em setembro de 2001, coletaram-se amostras nas profundidades de 1-4 cm, 5-8 cm, 10-13 cm, 15-18 cm, 20-13 cm, 35-38 cm, 50-53 cm, 75-78 cm e 100-103 cm, nos latossolos.

No laboratório de Física de Solos, Depto de Solos/CCR/UFSM, as amostras foram saturadas e equilibradas nos potenciais de - 1 kPa, - 2 kPa, -4 kPa, -6 kPa em mesa de tensão, e nos potenciais de -10 kPa e - 33 kPa em câmara de Richards. Em função da quantidade de água retida em cada potencial, determinou-se a percentagem de poros menores que determinado diâmetro utilizando a equação de ascensão capilar (EMBRAPA, 1997).

$$r = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho gh} \quad [10]$$

onde: r = raio do poro (cm);

α = ângulo de contato da água com o poro;

ρ = densidade do líquido (g cm^3);

σ = tensão superficial do líquido (din cm^{-1});

g = força da gravidade (cm s^{-2});

h = tensão do líquido no solo (cm);

Coletaram-se amostras com estrutura parcialmente alteradas (torrões) para determinação do diâmetro médio de agregados estáveis em água (DMG). Os agregados foram separados manualmente e peneirados com malha de diâmetro entre 4,76 mm e 8,00 mm e os agregados retidos na peneira de 4,76 mm foram submetidos ao peneiramento em água pelo método de Kemper & Chepil (1965).

A resistência mecânica à penetração (RP) do solo foi determinada até a profundidade de 40 cm, com penetrógrafo manual (Rimik CP 20), o qual, possui armazenamento eletrônico de dados, ponta cônica com ângulo de 30° e 12,83 mm de diâmetro da base do cone.

A implantação das culturas era realizada com semeadora-adubadora de discos, colocando a semente em torno de 3 cm para o trigo e 7 cm para o milho e soja. A produtividade das culturas do trigo, soja e milho foi avaliada colhendo-se uma área representativa em cada estado de compactação.

No ano agrícola de 1999/2000, no Latossolo Vermelho distrófico, determinou-se à quantidade de raízes de soja no maior estado de compactação e no menor estado de compactação no pleno florescimento da soja. As raízes foram coletadas em um cilindro de 40 cm de comprimento por 9,20 cm de largura, inserido no solo por um macaco hidráulico. Coletaram-se dois cilindros por planta e duas plantas por estado de compactação. As amostras de solo com raízes coletas nos cilindros foram divididas a cada 5 cm e no laboratório, as raízes foram separadas do solo por lavagem com água sob pressão. As raízes ficavam retidas em um jogo de peneiras de 2 mm, 1 mm e 0,5 mm, e depois eram contadas utilizando o método da interseção de Newman modificado por Tennant (1975).

As comparações de médias entre os estados de compactação em cada solo foram realizadas pelo teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) com probabilidade de erro de 5 %, utilizando o programa estatístico SAS (Statistical Analysis System, 1985).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade e porosidade do solo

As avaliações de densidade do solo foram realizadas em duas épocas: (1) após a identificação dos estados de compactação (novembro de 1999) e (2) em setembro de 2001.

Época 1, novembro de 1999

Na determinação de novembro de 1999, os valores de D_s não diferiram entre os estados de compactação nos dois tipos de solos. Apenas maiores valores de D_s e menor PT na camada de 5 cm a 12,5 cm em todos os estados de compactação. Na camada entre 7,5 cm e 12,5 cm, encontra-se a camada de maior D_s para os três estados de compactação, indicando que o tráfego de máquinas exerceu um aumento da D_s nesta profundidade e foi maior na extremidade da lavoura (Figura 32). Na superfície, a atividade biológica, ciclos de umedecimento e secagem e o revolvimento mecânico realizado pelos discos das semeadoras-adubadoras agem no sentido de diminuir a D_s na superfície. Abaixo de 15 cm, não há efeito do rodado dos pneus no aumento de D_s (Nesmith et al., 1987). No menor EC, a D_s na profundidade de 2,5 cm foi de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, na profundidade 7,5 cm de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ e na profundidade de 12,5 cm foi de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$, valores esses semelhantes aos valores de D_s encontrados em campo nativo no Latossolo Vermelho distrófico por Da Ros et al. (1997).

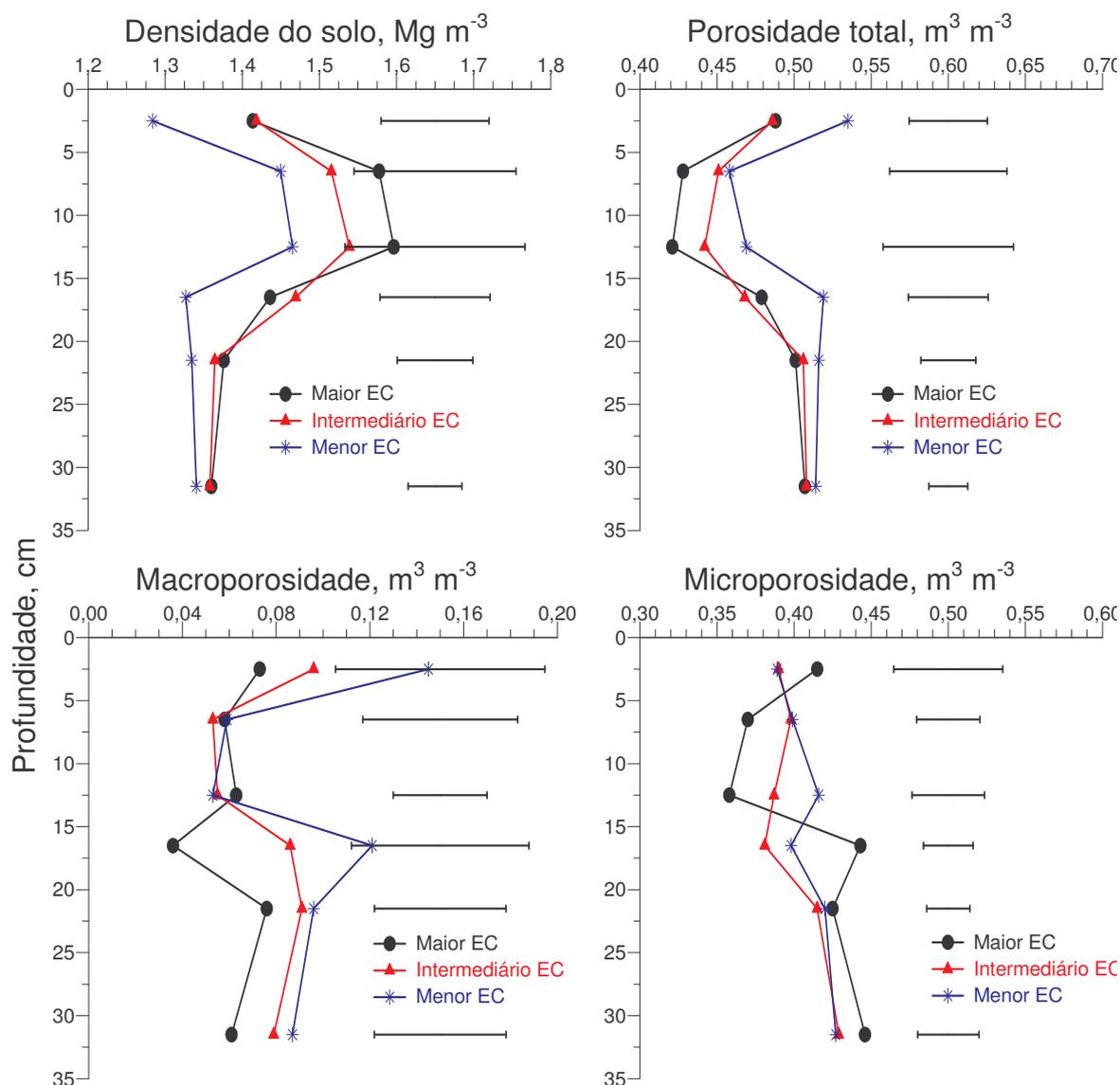


FIGURA 32. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Barras horizontais comparam os estados de compactação para a mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$). Coletado em novembro de 1999.

Albuquerque et al. (1995) verificaram a formação de uma camada de maior Ds na profundidade de 8 a 16 cm, com Ds de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, em relação à camada superficial (1 a 8 cm), com Ds de $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$, num Latossolo Vermelho distrófico cultivado em plantio direto. O aumento da Ds na camada

entre 8 e 15 cm tem sido verificada em lavouras sob plantio direto no Brasil e em todo o mundo.

Analisando os valores da porosidade total (PT) para o Latossolo Vermelho distrófico, percebe-se que houve diferenças entre as profundidades. Nas camadas de 5 a 8 cm e de 10 a 13 cm, foram encontrados os menores valores de PT, coincidindo com a camada compactada baseando-se nos valores de Ds. Para a macroporosidade do solo, todos os estados de compactação apresentaram valores de macroporosidade abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerado como limite inferior para uma adequada taxa de trocas gasosas e adequado crescimento de diversas plantas (Grable & Siemer, 1968; Gupta & Allmaras, 1987).

Na situação de menor EC, a macroporosidade foi superior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas profundidades de 1 a 4 cm ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e na profundidade de 15 a 18 cm ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na camada compactada (5 cm a 13 cm), os valores da macroporosidade foram, em geral, próximos a $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para todos os estados de compactação (Figura 32). Abaixo de 17,5 cm a macroporosidade foi próxima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

No Latossolo Vermelho Distroférico típico, o maior EC apresentou valores de Ds superiores aos demais estados de compactação na profundidade de 15 a 18 cm. Nessa camada, o valor de Ds foi de $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ na situação de maior EC, de $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ na situação de intermediário EC e de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ na situação de menor EC (Figura 33). Para o mesmo estado de compactação, a variação dos valores de Ds ao longo da profundidade, permitiu identificar uma camada compactada que se estende dos 5 cm aos 13 cm (Figura 33).

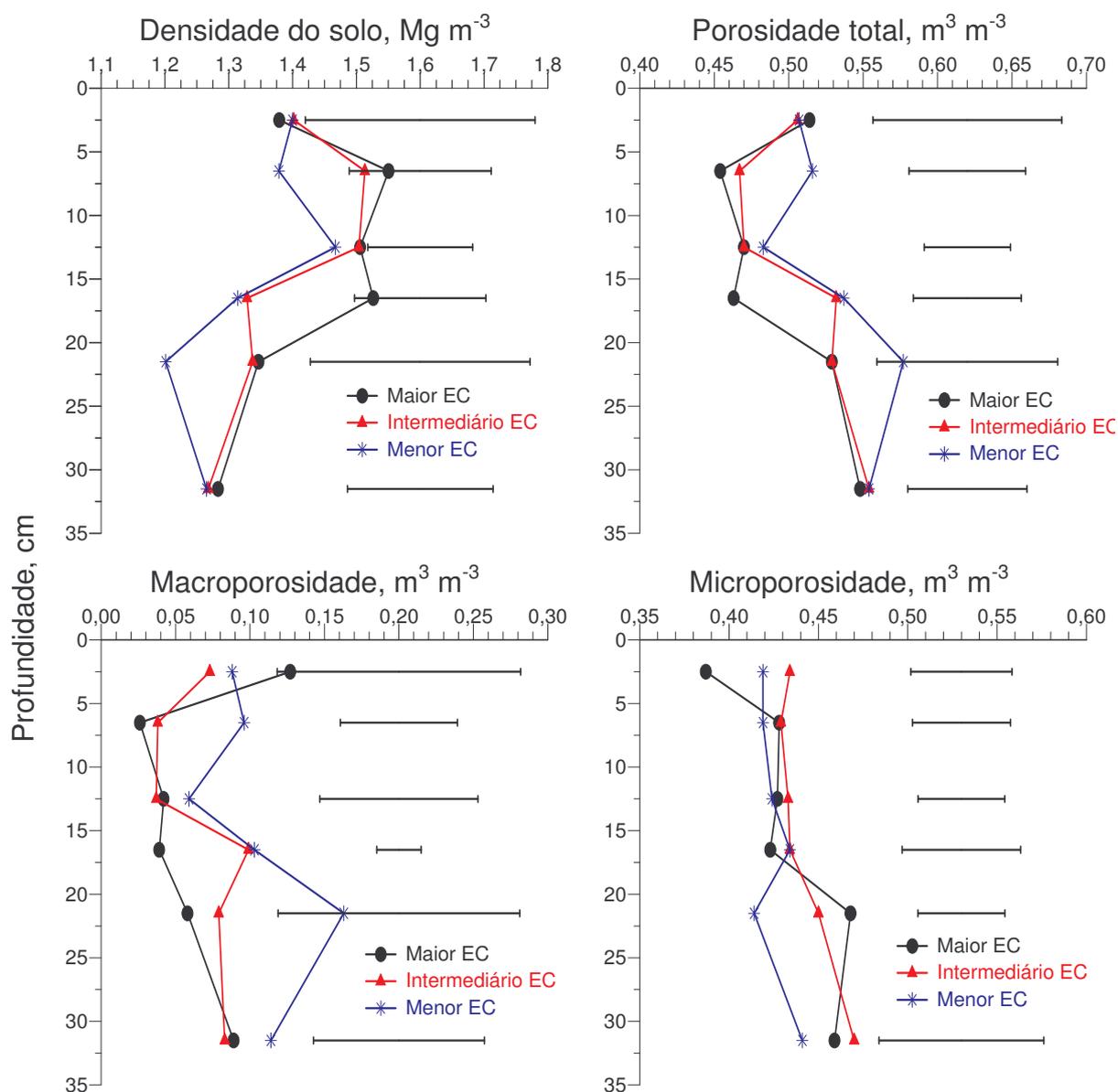


FIGURA 33. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Barras horizontais comparam os estados de compactação para a mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$). Coletado em novembro de 1999.

No Latossolo Vermelho distroférico típico, os valores de PT não diferiram entre os estados de compactação, apenas entre as profundidades (Figura 33). Os valores de macroporosidade foram inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas

situações de maior EC e intermediário EC, exceto para a camada superficial da situação de maior EC, que apresentou valor de macroporosidade em torno de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A camada superficial é afetada pela atividade biológica e a semeadura das culturas exerce um pequeno revolvimento do solo, diminuindo os efeitos negativos da compactação do solo. No maior estado de compactação, na camada compactada (5 a 13 cm e 15 a 18 cm), os valores de macroporosidade foram de aproximadamente $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Na situação de menor EC, os valores de macroporosidade foram próximos a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 1 a 4 cm e 5 a 8 cm e, superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nas camadas abaixo de 15 cm até 33 cm (Figura 33). Apenas na camada em torno dos 10 cm, a macroporosidade foi de $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, indicando compactação do solo pelo tráfego de máquinas.

Época 2, setembro de 2001

Na segunda avaliação de Ds e de porosidades, verificamos no Latossolo Vermelho distrófico (Figura 34) diferença significativa entre os valores de Ds nos estados de compactação maior e intermediário para os tratamentos menor EC e a área com escarificação. Abaixo de 38 cm, onde não ocorre efeito da escarificação e do tráfego de máquinas, os valores de Ds são próximos de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ para todos os tratamentos. Maiores valores de Ds no plantio direto nos 15 cm superficiais comparados aos sistemas de manejo com revolvimento do solo foram encontrados por Correchel et al. (1999), num Latossolo Vermelho na região de Guará-SP. Ball-Coelho et al. (1998), num solo franco arenoso do Canadá verificou que a Ds inibiu o crescimento radicular no plantio direto quando o solo estava seco (-100 kPa de potencial matricial). Nas profundidades maiores que 15 cm, Ball-Coelho et al. (1998) não verificaram diferenças de Ds entre o plantio direto e o preparo convencional. Os valores de Ds na camada de 7,5 cm a 25 cm no maior EC e no intermediário EC foram

superiores aos valores considerados críticos ao desenvolvimento de plantas ($1,43 \text{ Mg m}^{-3}$), determinado quando o intervalo hídrico é zero (Capítulo 2).

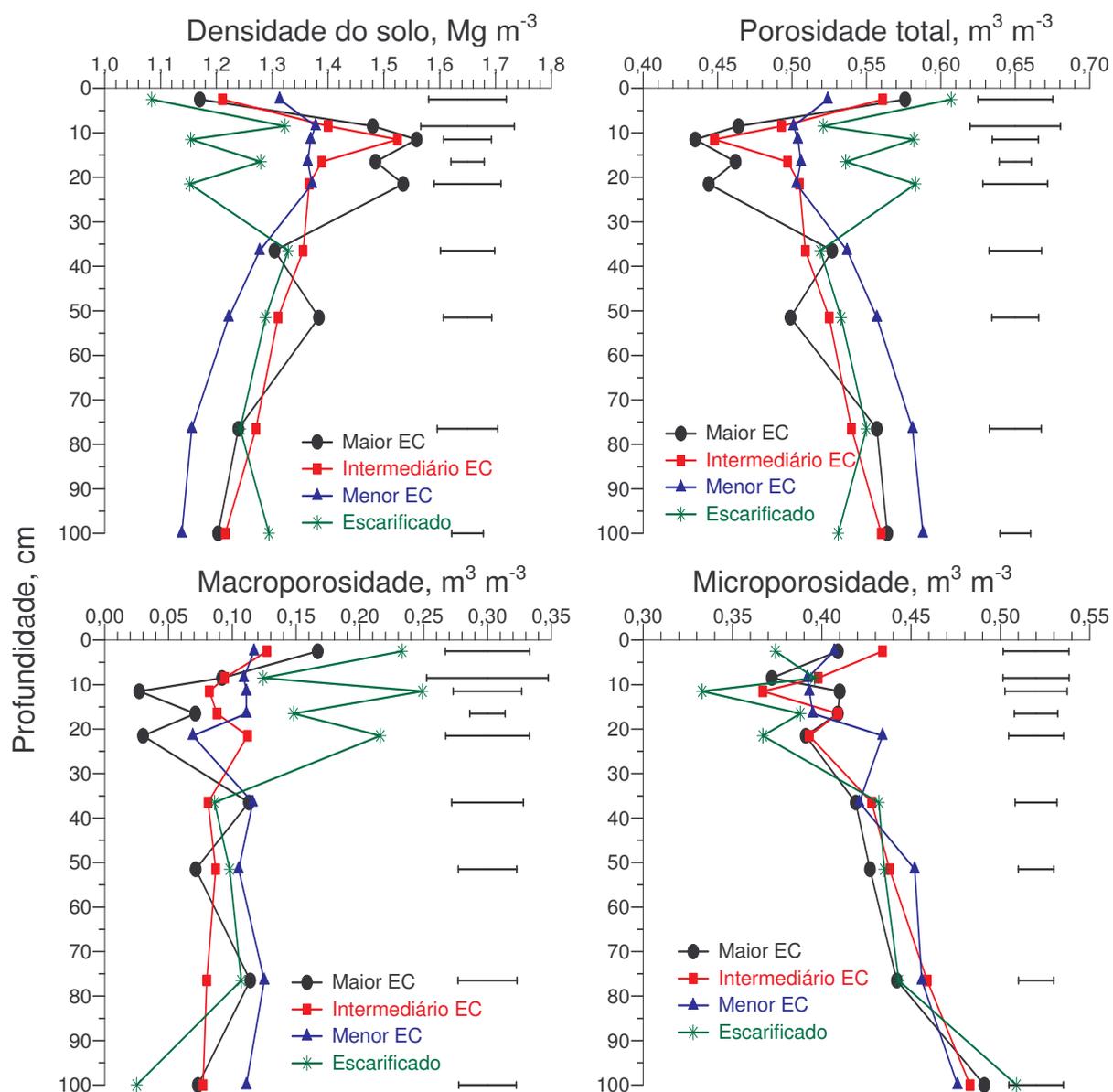


FIGURA 34. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Barras horizontais comparam tratamento na mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$). Coletado em setembro de 2001.

Entre 10 cm e 23 cm, a situação de maior EC apresentou valores de Ds acima de $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que na área escarificada a Ds foi próxima de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 34). Stone & Silveira (2001) também encontraram maiores valores de Ds e menores valores de PT para o plantio direto quando comparado com o sistema com revolvimento. Em onze anos de experimento e em três locais, Hill (1990) encontrou maior Ds no plantio direto do que no convencional, na camada de 6,7 cm a 17,2 cm. Resultados semelhantes também foram encontrados por Vieira & Muzilli (1984). Segundo Unger & Jones (1998), estudando esquemas de rotações de culturas em plantio direto e preparo convencional, verificaram maior Ds e RP no plantio direto do que no preparo convencional, na camada de zero a 10 cm e, abaixo dessa, não houve diferenças de Ds e RP entre os métodos de preparo do solo.

Os valores de PT seguiram a distribuição dos valores de Ds, na camada superficial, os valores foram acima de $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e na camada compactada, em torno de $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no maior EC e no intermediário EC. Nos tratamentos menor EC e escarificado, a PT foi superior a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em todas as profundidades (Figura 34), concordando com os valores de PT encontradas por Da Ros et al. (1997) nesse mesmo tipo de solo.

No maior EC, a macroporosidade do solo foi bastante baixa, próxima a $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nas profundidades de 10 a 13 cm e de 20 a 23 cm. Valores de macroporosidade de $0,043 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o plantio direto foi determinado por Da Ros et al. (1997) na profundidade de 7-14 cm para o plantio direto, enquanto que o campo nativo apresentou macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Albuquerque et al. (1995), nesse mesmo tipo de solo, verificaram macroporosidade de $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o preparo convencional (PC) e $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no plantio direto (PD), na camada de 1 a 8 cm e macroporosidade de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no PC e $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no PD na camada de 8 a 16 cm. Com exceção da camada superficial, os tratamentos; maior EC e intermediário EC apresentaram macroporosidade inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que os tratamentos; menor EC e área escarificada apresentaram valores acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Stone & Silveira (2001) também verificaram maiores valores de macroporosidade e menores de

microporosidade para o sistema com revolvimento do solo do que com o plantio direto.

Em geral, os valores de microporosidade para o tratamento maior EC foram superiores aos verificados por Da Ros et al. (1997). Os valores mais baixos de microporosidade foram verificados para o tratamento com escarificação, em virtude de apresentar maior macroporosidade.

Os valores de D_s não diferiram entre os estados de compactação, inclusive não diferindo da área escarificada (Figura 35). Valores semelhantes de D_s entre os tratamentos sob plantio direto e a escarificação são atribuídos a recompactação do solo, visto que a coleta de amostras para a D_s foi realizada cerca de 1 ano após ser implantado o tratamento com escarificação. Bassani (1996) verificaram que o efeito do preparo do solo na diminuição da D_s foi de apenas 1 ano, num Argissolo Vermelho-Amarelo.

Apenas na camada de 1-4 cm, o valor de D_s na área escarificada foi significativamente menor que os demais tratamentos (Figura 35). Os valores da D_s verificadas na camada de 7,5 cm a 15 cm de todos os tratamentos são superiores ao valor da D_s crítica para este tipo de solo ($1,40 \text{ Mg m}^{-3}$), determinado quando o intervalo hídrico ótimo é zero (Capítulo 2). Os valores de D_s na camada de 7,5 cm a 15 cm estão muito próximos e, até mesmo, acima do valor considerado crítico ($1,45 \text{ Mg m}^{-3}$) para o desenvolvimento de plantas para solos argilosos nas condições do estado do Rio Grande do Sul (Reinert et al., 2001).

Os valores de PT foram superiores na área escarificada em relação aos demais estados de compactação (Figura 35). Em geral, os menores valores de PT concentraram-se na camada de 10 a 15 cm. No maior EC, na profundidade entre 7 e 15 cm, os valores de macroporosidade foram baixos, em torno de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Valores inferiores a $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foram determinados em todos os tratamentos, sempre na camada compactada. Isso indica que, em todos os tratamentos, existe uma camada que pode provocar restrição ao desenvolvimento das plantas (Figura 35).

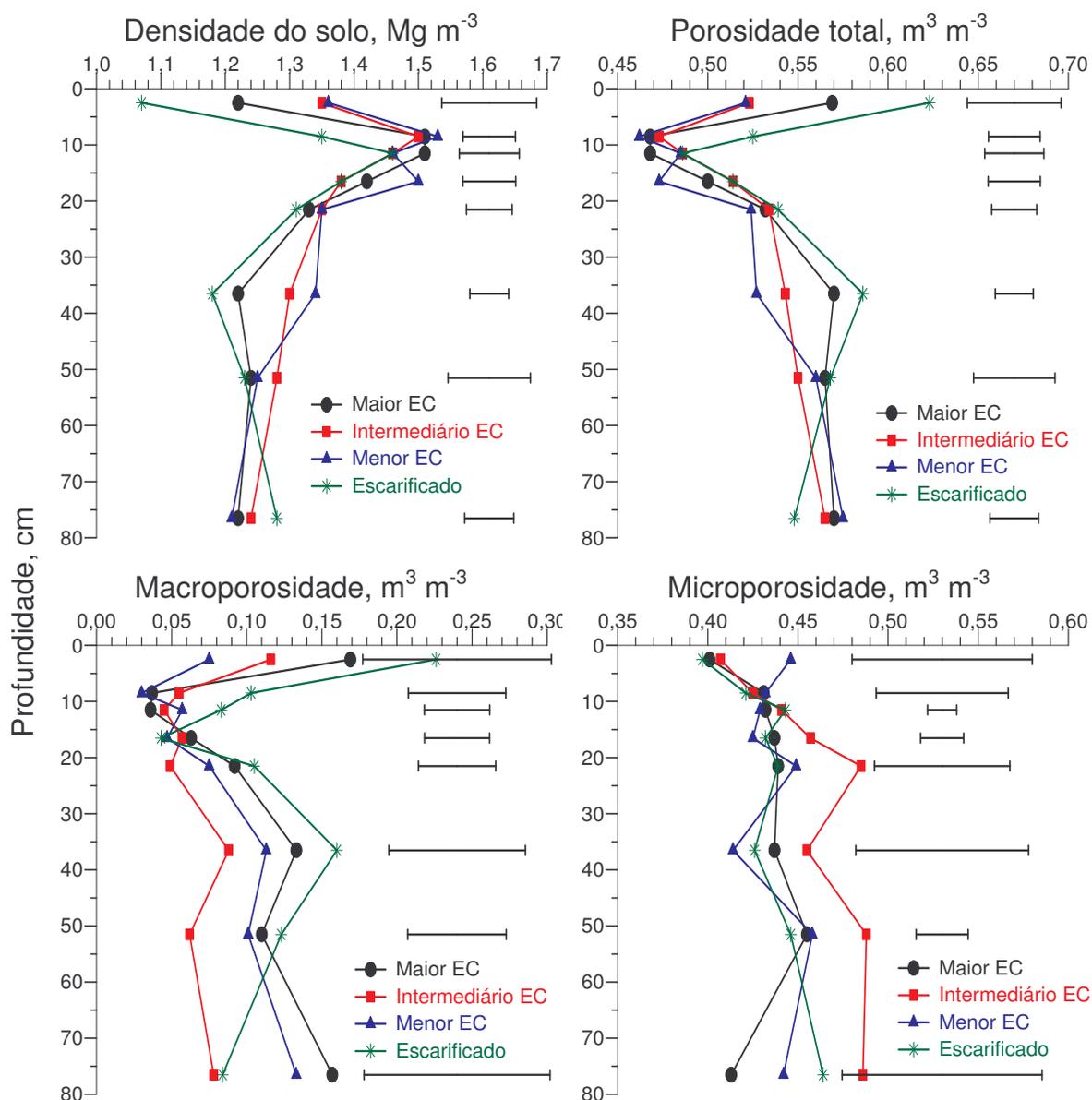


FIGURA 35. Valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Barras horizontais comparam tratamento na mesma profundidade, pelo teste DMS ($P < 5\%$) em setembro de 2001.

Os poros do solo são responsáveis pelo transporte e armazenamento de água no interior do solo, também, são importantes como reservatório e troca de gases do solo com a atmosfera (Messing et al., 1995). Seu diâmetro e a continuidade dos mesmos no perfil do solo determinam a taxa de infiltração de

água no solo. Quanto à aeração, a taxa de difusão de oxigênio da atmosfera para o solo possui correlação direta com a quantidade de macroporos do solo. Wu et al. (1992) relatam que no plantio direto os poros conduzem água mais eficientemente do que no preparo convencional, mesmo possuindo porosidade total inferior do que o preparo convencional. A redução de volume do solo ocorre quando a capacidade de suporte do solo é vencida e acontece o deslocamento e a ordenação das partículas sólidas nos espaços vazios. Poros maiores que 50 μm são considerados macroporos e são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação.

No Latossolo Vermelho distrófico, na camada de 1 cm a 4 cm, o maior EC apresentou maior quantidade de poros entre 50 μm e 75 μm , comparado com o Intermediário EC e o menor EC (Figura 36). Essa maior percentagem de poros pode estar associada aos processos biológicos de crescimento de raízes e atividade biológica aliado ao revolvimento do solo provocado pela semeadoura que favorece a descompactação do solo. O revolvimento do solo pela escarificação elevou a quantidade de poros grandes da superfície até 23 cm de profundidade.

No Latossolo Vermelho distroférico típico, o efeito da escarificação foi visualizado somente na camada de 7-10 cm (Figura 37), indicando que a escarificação foi superficial. Nas demais profundidades, não houve diferenças entre a percentagem de poros acima de 7 micras entre os estados de compactação e a área escarificada. Estudo realizado por Johnson et al. (1984) demonstrou que o preparo convencional apresentou quantidade de poros de maior diâmetro e poucos poros de menor diâmetro (microporos) capazes de armazenar H_2O em tensões menores que 10 kPa.

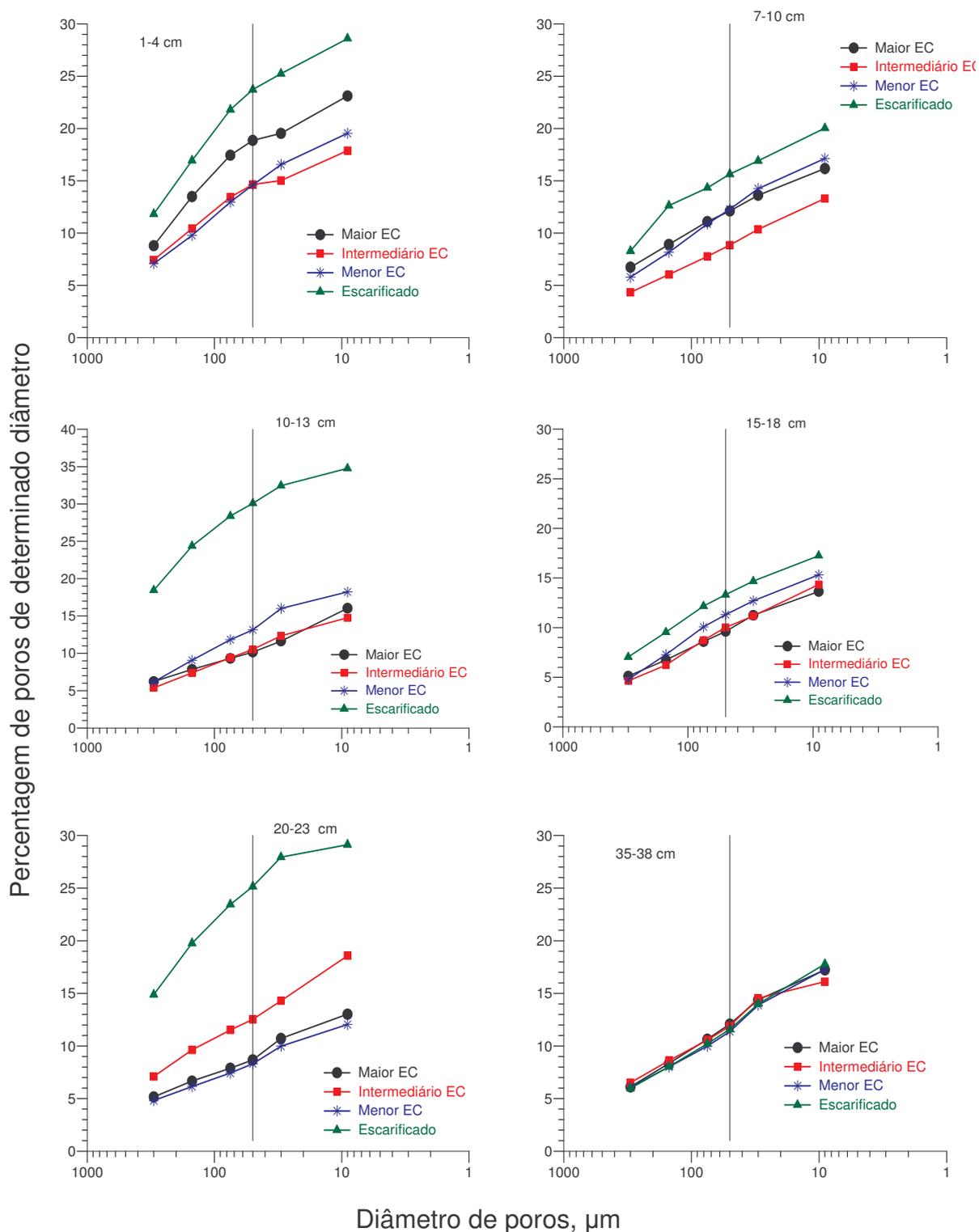


FIGURA 36. Percentagem acumulada de poros de determinado diâmetro, num Latossolo Vermelho distrófico. Linha vertical indica poros com 53 μm .

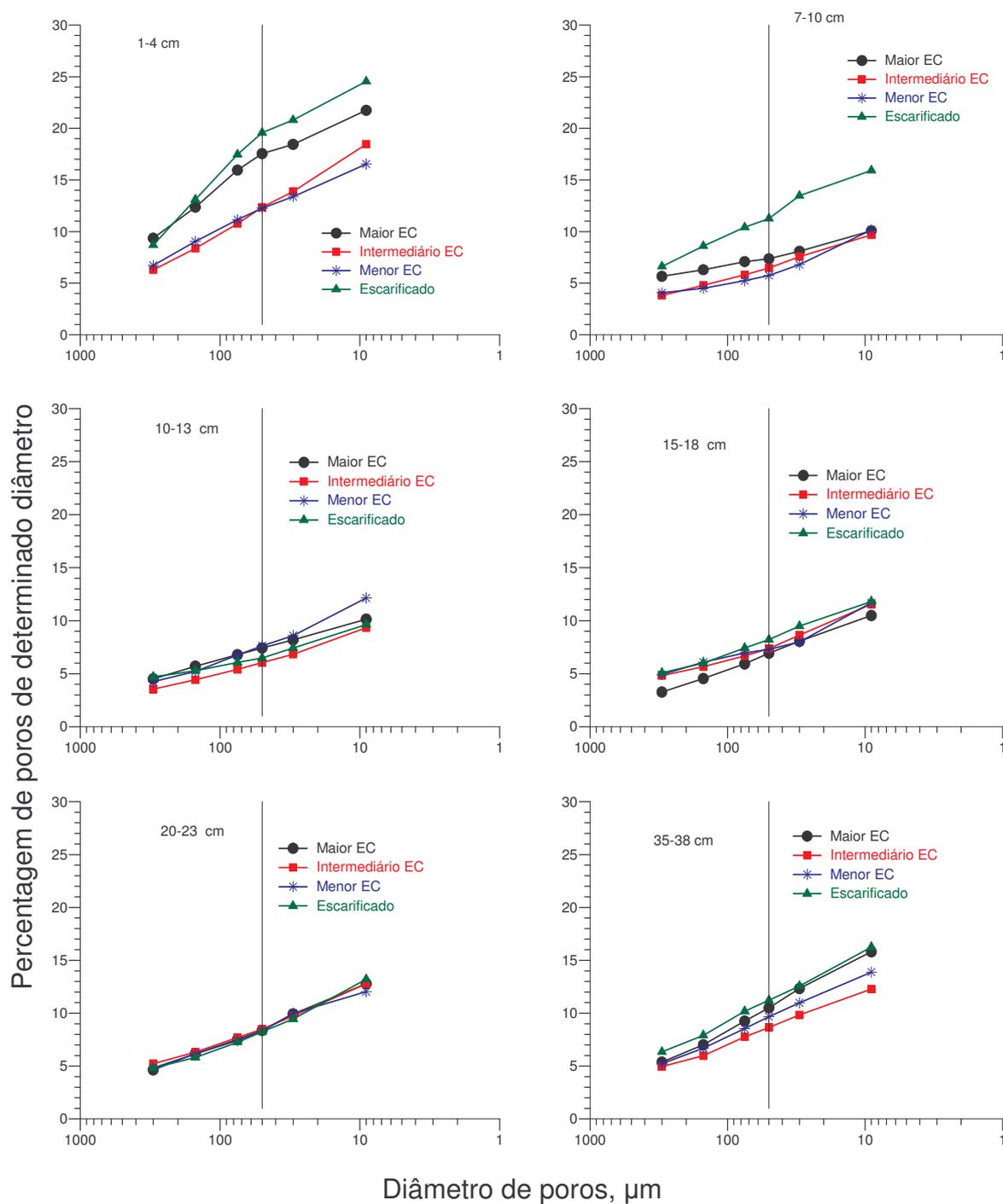


FIGURA 37. Percentagem acumulada de poros de determinado diâmetro, num Latossolo Vermelho distroférrico típico. Linha vertical indica poros com 53 μm .

Resistência mecânica à penetração radicular e agregação do solo

A resistência do solo à penetração (RP) é uma propriedade física do solo que influencia diretamente no crescimento das raízes das plantas (Letey, 1985; Thompson et al., 1987). Os valores de RP são influenciados pela umidade e pela D_s , sendo correlacionada positiva e exponencialmente com a D_s e negativa e exponencialmente com a umidade do solo (Busscher, 1990; Busscher et al., 1997; Vaz, et al., 2001). No presente estudo, no Latossolo Vermelho distrófico, os valores de RP no maior EC foram cerca de 1,0 MPa superiores ao determinados para os estados de compactação intermediário e menor (Figura 38). Os valores de RP no maior EC foram superiores aos demais estados de compactação da superfície até os 25 cm de profundidade. Busscher et al. (2001) encontraram maior RP da superfície até 30 cm de profundidade no plantio direto comparado ao tratamento escarificado.

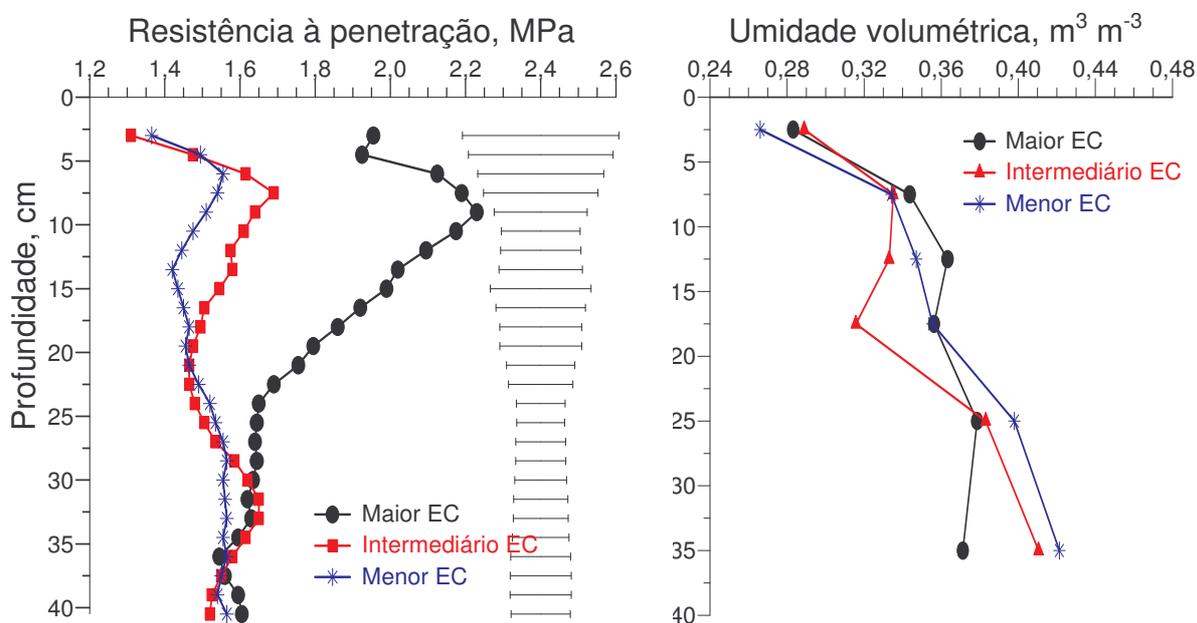


FIGURA 38. Valores de resistência mecânica do solo à penetração e umidade volumétrica do solo ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Determinado em maio de 2000.

Diferentes valores de RP são referenciados na literatura como limitantes ao desenvolvimento radicular e da produção e massa seca de grãos das plantas. Tal fato deve-se à utilização de diferentes espécies vegetais, diferentes tipos de solos e diferentes condições de condução do experimento. Porém, na maioria dos experimentos relacionando o crescimento de raízes e RP indicam que valores de RP acima de 2,0 MPa são considerados limitantes ao crescimento das raízes de diversas culturas (Taylor et al., 1966; Nesmith, 1987; Hakansson et al., 1988). Esse valor de 2 MPa foi determinado, na sua maioria, em experimentos com plântulas e em solos desestruturados colocados em vasos. No campo, contudo, a variabilidade espacial e temporal da umidade do solo e da Ds, aliada a poros biológicos, rachaduras e fendas que existem no perfil do solo proporcionam crescimento das plantas em condições de maior RP do que verificado em condições de vaso. Em condições de campo, Ehlers et al. (1983), relatam que as raízes podem crescer em condições de RP maiores que 5 MPa. O método de medição da RP não é capaz de identificar e integrar o efeito de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo e é por essas regiões de menor resistência que as raízes conseguem se desenvolver, mesmo em solos com alta RP.

No nosso estudo, o valor de RP para o maior EC foi de 3,2 MPa na profundidade de 10 cm, acima do valor de RP considerado limitante ao desenvolvimento das plantas (Figura 39).

A umidade do solo apresentou pequena variação entre os estados de compactação até a profundidade de 7,5 cm (Figura 38). A umidade do solo varia espacial e temporalmente no solo (Libardi, et al., 1996; Gonçalves et al., 1999) e, durante o ciclo das plantas, essas estão submetidas a períodos de alta e de baixa RP (Martino & Shaykewich, 1994). A importância do sistema de manejo do solo ou de condições de lavouras com menor EC reside no período (dias) em que o solo permanece em condições hídricas não limitantes ao crescimento radicular.

Na avaliação de RP, realizada em outubro de 2001, o tratamento intermediário EC e o tratamento maior EC apresentaram valores de RP

superiores a 2,0 MPa, sendo próximos a 3,0 MPa na profundidade entre 5 e 15 cm. No menor EC, os valores de RP foram próximos a 2,0 MPa na profundidade de 5 a 10 cm. No tratamento escarificado, a RP foi próxima a 1,0 MPa até 30 cm, bem menor do que os demais tratamentos (Figura 39), discordando dos valores encontrados por Silva et al. (2000a), que verificaram valores altos de RP (superiores a 2 MPa) na camada de 5 a 20 cm no plantio direto e preparo convencional, em um Latossolo Roxo do Paraná. Percebe-se, também, que os tratamentos maior e intermediário EC diferem dos demais tratamentos até a profundidade de 35 cm.

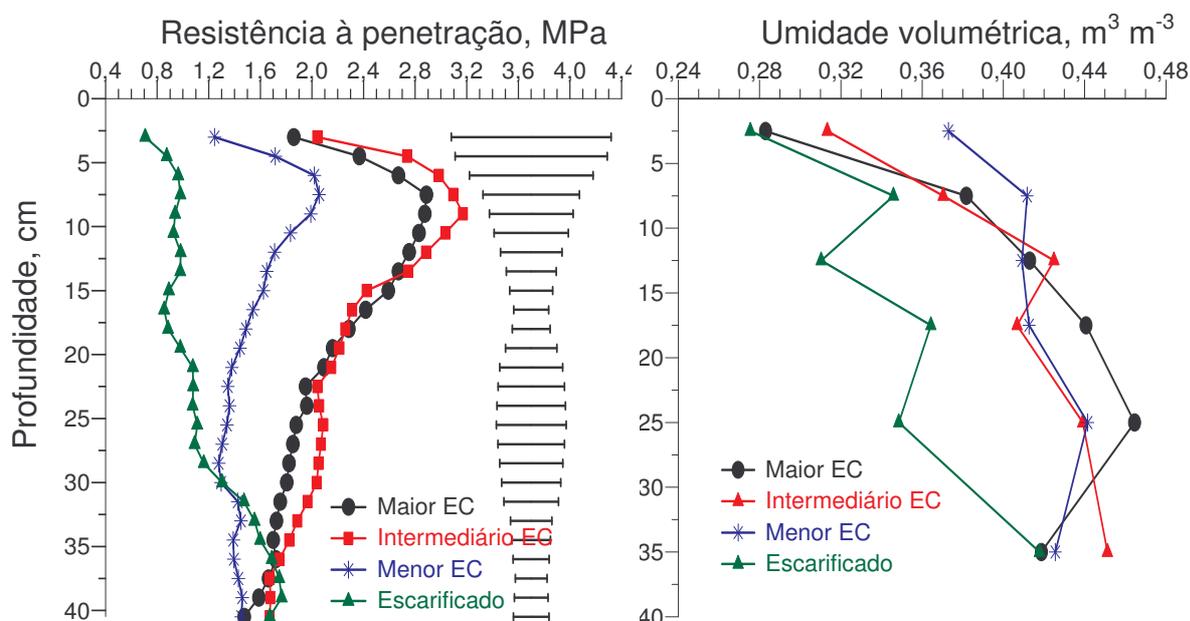


FIGURA 39. Valores de resistência mecânica do solo à penetração (a) e umidade volumétrica do solo (b) ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico. Determinado em outubro de 2001.

A condição de umidade do solo no dia de determinação da RP era um pouco superior no menor EC e semelhante para os demais estados de compactação e para a área escarificada a 2,5 cm. Abaixo dessa profundidade, a umidade do solo no escarificado foi menor que os tratamentos com plantio direto, até a profundidade de 25 cm.

Convém ressaltar a melhor sensibilidade da técnica de determinação da RP em detectar diferenças entre manejos de solo em comparação com determinações da relação massa/volume, concordando com as observações de Voochrees et al. (1978).

No Latossolo Vermelho distroférico típico, a determinação de RP realizada em maio de 2000, na condição de maior EC, o solo estava em uma condição de umidade em que não foi possível inserir no solo o cone do penetrógrafo. A umidade volumétrica estava torno de $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada superficial no maior EC, $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no intermediário EC e em torno de $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no menor EC (Figura 40). Nos estados de compactação; intermediário e menor, foi possível medir a RP, encontrando-se, na profundidade de 10 cm, valores de 3,4 MPa no intermediário EC e em torno de 2,8 MPa para o menor EC (Figura 40). Os valores de umidade do solo são praticamente iguais para os três estados de compactação, inclusive maior umidade no solo no maior EC e, mesmo assim, não foi possível determinar a RP nessa condição de compactação.

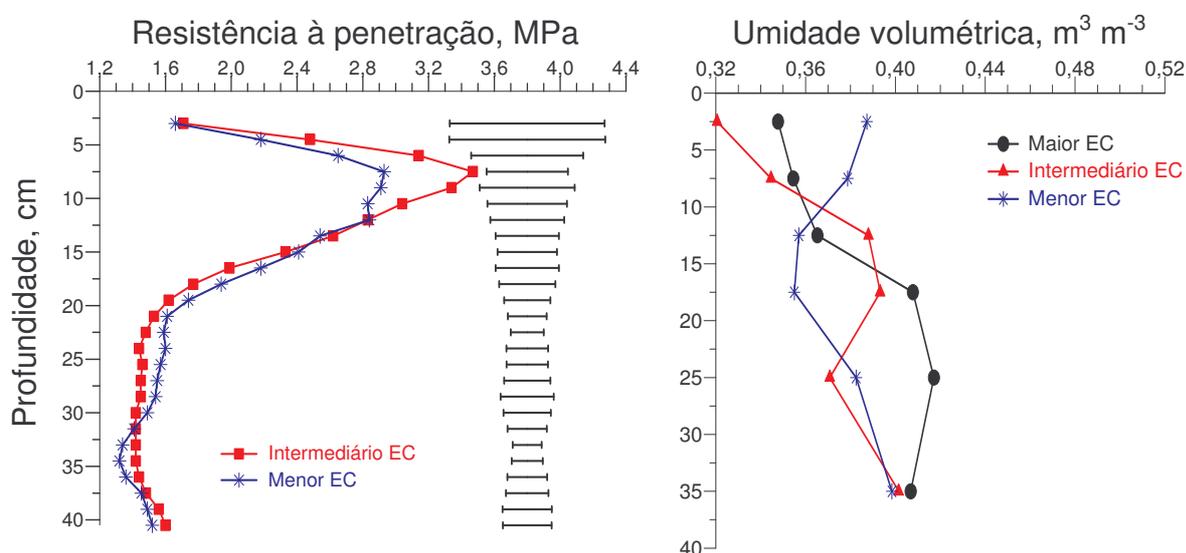


FIGURA 40. Valores de resistência mecânica do solo à penetração e umidade volumétrica do solo ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Determinado em maio de 2000. Obs. Nessa umidade, o tratamento maior estado de compactação não foi possível realizar a leitura no penetrógrafo.

Valores de RP iguais ou acima de 2 MPa, aliados à baixa umidade do solo, são limitantes ao crescimento das plantas. Solos com grande quantidade de argila têm como característica a forte união dos agregados pelas cargas elétricas nas superfícies das argilas e, quando o solo está com pouca umidade, a ligação entre as partículas de argila são muito fortes, conferindo uma grande resistência à penetração nesses solos.

Na determinação da RP em outubro de 2001, no Latossolo Vermelho distroférico típico, os valores de RP diferiram entre os estados de compactação e entre a área escarificada, somente na camada entre 7,5 cm e 13,5 cm, sendo que o intermediário e o maior EC diferiram do menor EC e do escarificado (Figura 41). De uma maneira geral, valores acima de 2 MPa foram verificados na camada entre 5 cm e 17,5 cm em todos os tratamentos. Os resultados de Ds e RP mostram que os solos argilosos são mais suscetíveis à compactação se mal manejados, haja vista que, em um ano após a escarificação, o solo apresentou valores de RP e Ds praticamente iguais ao manejo plantio direto.

Nas duas épocas de determinação da RP, foi identificada uma camada compactada abaixo dos 7,5 cm até a profundidade de 17,5 cm. Comparando os dois tipos de solos, de maneira geral, visualiza-se que o Latossolo Vermelho distroférico típico apresenta maiores valores de RP e no Latossolo Vermelho distrófico são visualizadas as diferenças entre os estados de compactação. Analisando conjuntamente os resultados de Ds, porosidades e RP, percebemos que o Latossolo Vermelho distroférico típico está mais degradado fisicamente do que o Latossolo Vermelho distrófico. O sistema de cultivo no Latossolo Vermelho distrófico possui a cultura do milho como sucessão anual da soja, enquanto que no Latossolo Vermelho distroférico típico, o agricultor não utiliza o milho na área em que se realizou este estudo. A inclusão do milho na sucessão da soja modifica o sistema de tráfego na lavoura, o tipo de sistema radicular, adiciona outros compostos orgânicos na rizosfera, dentre outros benefícios da rotação de culturas.

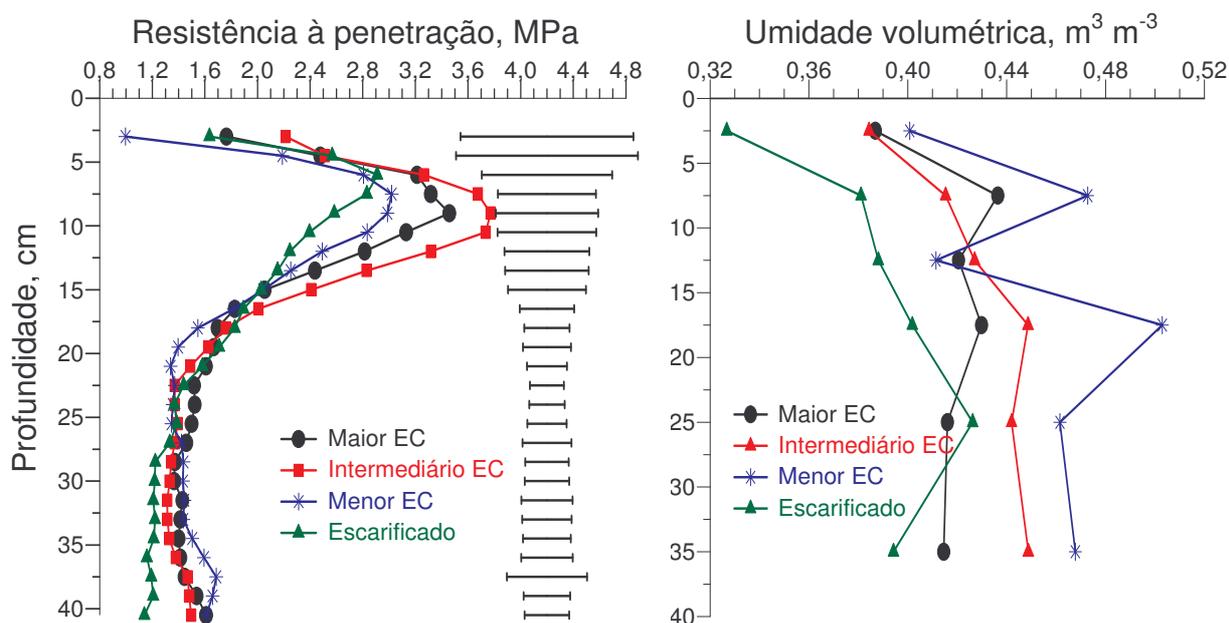


FIGURA 41. Valores de resistência mecânica do solo à penetração e umidade volumétrica do solo ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distroférico típico. Determinada em outubro de 2001.

Segundo Voorhees et al. (1978), a RP apresentou maior sensibilidade como indicador de camadas e estados de compactação. No estudo dos autores acima, o tráfego de máquinas aumentou a D_s em 20 %, enquanto que, a RP foi aumentada em 400 %. Por isso e, aliado à sua facilidade de determinação, a RP tem se mostrado muito útil na identificação de camadas compactadas.

Nos dois tipos de solos, visualizou-se que a estrutura do solo na camada compactada e na superfície dos dois tipos de solos apresenta forma maciça, formada por lâminas comprimidas umas às outras por compressão do tráfego de máquinas, com poucos poros visíveis e agregados com arestas vivas. Na superfície (0-5 cm), a distribuição do diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água, não diferiu entre os estados de compactação sob plantio direto, variando de 6,42 mm no maior EC até 4,94 mm no menor EC (Tabela 8). Somente ocorreram diferenças entre o maior EC e a área escarificada. A escarificação não inverte camadas do solo e, por isso, degrada menos a estrutura do solo quando comparada com o arado de discos e a grade.

TABELA 8. Distribuição do diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água nos diferentes estados de compactação e no escarificado, em três profundidades no Latossolo Vermelho distrófico (LE) e no Latossolo Vermelho distroférico típico (LR).

Sistema	Estado de compactação	DMG, mm	
		LE	LR
----- Profundidade 0-5 cm-----			
Plantio direto	Maior	6,43 Aa	5,30 Aa
Plantio direto	Intermediário	5,09 ABa	5,19 Aa
Plantio direto	Menor	4,94 ABa	4,51 Aa
Escarificado		4,32 Ba	4,65 Aa
----- Profundidade 8-13 cm-----			
Plantio direto	Maior	6,57 Aa	6,54 Aa
Plantio direto	Intermediário	5,43 Ba	1,60 Ab
Plantio direto	Menor	4,73 Ba	1,94 Ab
Escarificado		2,35 Cb	3,24 Ab
----- Profundidade 20-25 cm-----			
Plantio direto	Maior	1,38 Cb	0,87 ABa
Plantio direto	Intermediário	4,94 Aa	0,81 Bc
Plantio direto	Menor	3,48 Ba	0,87 ABC
Escarificado		3,83 Ba	1,10 Ac

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na coluna, compara estados de compactação na mesma profundidade e médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, compara profundidade em cada estado de compactação, não diferem entre si pelo teste DMS ($P < 5\%$).

Semelhantemente ao verificado na camada superficial, na camada compactada, o maior DMG ocorreu no maior EC, diferindo dos demais tratamentos. Nessa profundidade, o efeito compressivo do tráfego de máquinas tem grande importância nos valores do DMG. Em uma primeira avaliação, poderíamos inferir que, com maior DMG de agregados, poderíamos ter uma condição de solo mais favorável ao desenvolvimento radicular, o que não se comprova com os valores de Ds, RP e, principalmente, pela macroporosidade que, nessa camada, é bastante baixa. Na profundidade de 20-25 cm, onde os efeitos do tráfego de máquinas e da matéria orgânica são pequenos, a condição de maior EC apresentou menor DMG que as demais. Carpenedo & Mielniczuk (1990) verificaram que o plantio direto em solo muito argiloso aumentou a agregação do solo e esses agregados eram compactos e com a

predominância de microporos, evidenciando serem formados por forças compressivas e não por ação biológica. Silva et al. (2000a) verificaram agregados maiores no plantio direto e mais resistente do que no PC, em um Latossolo Roxo no Paraná.

No Latossolo Vermelho distroférico típico o DMG não diferiu entre os tratamentos na camada superficial (Tabela 8). Na camada de 8 a 13 cm, visualiza-se o resultado da compressão pelo tráfego de máquinas influenciando o DMG. Nesta profundidade, o tratamento intermediário e menor EC apresentaram DMG menor que os tratamentos escarificado e maior EC, porém não foram significativos, devido à grande variação entre as médias. Na camada de 20 a 25 cm, o DMG foi inferior ao das camadas superiores, diminuindo o efeito dos estados de compactação e da escarificação.

Estados de compactação e produtividade de plantas

A RP e a macroporosidade são fatores físicos que influenciam diretamente a produção das plantas (Letey, 1985). No Latossolo Vermelho distrófico a produtividade do trigo foi reduzida em 18 % ou 420 kg ha⁻¹ no maior EC em relação à produtividade na situação de menor EC (Tabela 10). Oussible & Crookston (1987) verificaram redução de 12 a 23 % na produtividade de trigo em um solo argiloso no Marrocos.

A situação que foi limitante para a cultura do trigo, não o foi para a soja (Tabela 9). Em duas safras, a produtividade da soja não diferiu entre os estados de compactação e, inclusive, da área escarificada. A situação acima comprova que os limites críticos ao desenvolvimento de planta são dependentes do tipo de planta. Busscher et al. (2000) verificaram redução na produtividade de trigo e soja com o aumento da RP, sendo que, para soja, a relação entre produtividade e RP foi mais fraca do que para o trigo, refletindo a capacidade da soja em se adaptar em solos com alta Ds e compensar períodos de alta RP.

TABELA 9. Produtividade (Mg ha^{-1}) de trigo, soja e milho nos diferentes estados de compactação, nos dois solos.

Tratamento	Trigo, 1999	Soja, 1999/2000	Soja, 2000/2001	Milho, 2000/2001
----- Latossolo Vermelho distrófico, Cruz Alta -----				
Maior EC	1,87 b	1,77 a	3,80 a	8,11 ab
Intermediário EC	2,15 a	1,72 a	3,53 a	7,43 bc
Menor EC	2,29 a	1,82 a	3,23 a	8,11 ab
Escarificado	NE*	NE	3,54 a	8,92 a
----- Latossolo Vermelho distroférico típico, Coronel Barros -----				
Maior EC	1,24 b	ND**	2,69 a	4,46 c
Intermediário EC	1,65 a	ND	2,70 a	6,16 b
Menor EC	1,88 a	ND	3,16 a	6,22 b
Escarificado	NE	ND	3,15 a	7,24 a

EC= estado de compactação. * NE – tratamento não existente no ano avaliado. **ND- Não determinado, devido a problemas climáticos nesta safra.

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pela DMS ($P < 5\%$).

Durante o ciclo do trigo, o solo permaneceu com maior umidade e, nas condições de pequena macroporosidade identificados no tratamento maior EC, o suprimento de oxigênio para as raízes pode ter sido deficiente. Nesmith et al. (1987) verificaram menor produtividade de trigo cultivado em plantio direto em relação ao preparo convencional e a subsolagem, atribuindo a menor produção no plantio direto à maior RP, maior Ds e uma possível deficiência de aeração no solo, visto que o teor de água no solo foi maior no plantio direto nos primeiros 15 cm de solo.

No Latossolo Vermelho distroférico típico em Coronel Barros, a produtividade de trigo foi reduzida em 34 % ou 640 kg ha^{-1} no maior EC em relação ao menor EC (Tabela 10). Por outro lado, a produtividade da soja não diferiu entre os estados de compactação, mas apresentou um pequeno aumento de produtividade quando o EC foi reduzido, semelhante ao tratamento escarificado. A subsolagem com o objetivo de diminuir o estado de compactação de um solo argiloso no Marrocos, promoveu o aumento de até 63 % na produtividade de trigo em um ano relativamente úmido (Oussible & Crookston, 1987).

Da mesma forma que o trigo, o milho foi sensível à compactação nos dois tipos de solos, concordando com Voorhees et al. (1989) que relatam que a soja é mais tolerante a camadas compactadas quando comparado com o milho. Para a cultura do milho, nas duas áreas experimentais (Cruz Alta e Coronel Barros), a produtividade foi maior no tratamento escarificado e sendo reduzida na medida que aumentava o estado de compactação. No Latossolo Vermelho distrófico a produtividade de milho foi reduzida em 9 % ou em 810 kg ha⁻¹ do maior EC e o do menor EC para a área que recebeu escarificação. Considerando a menor produtividade que ocorreu no intermediário EC, a redução de produtividade foi de 1,49 Mg ha⁻¹ ou cerca de 25 sacas de 60 kg. Canarache et al. (1984) estimaram em 18 % de redução na produtividade de milho para cada 0,10 Mg m⁻³ em aumento da Ds acima de 1,30 Mg m⁻³, em um solo com 300 a 400 g kg⁻¹ de argila.

A produtividade de milho no Latossolo Vermelho distroférico típico foi sensível aos estados de compactação. A maior produtividade foi na área que recebeu escarificação (7,24 Mg ha⁻¹) e a menor (4,46 Mg m⁻³) no maior EC. A redução de produtividade do milho que se desenvolveu em condições físicas de densidade, porosidades e RP menos limitantes em comparação com o maior EC foi de 38 % ou 2,78 Mg ha⁻¹. Essa diferença de produtividade entre a maior produção e a menor produção, foi a média da produtividade do milho no RS no ano 2001 (CONAB, 2002).

Estudos verificando reduções de produtividade em função da compactação do solo apresentam situações de aumento de produtividade em função de moderada compactação (Amazodo et al., 1983), situações de nenhum efeito (Silva et al., 2000b, c) e situações de redução de produtividade de até 50 % (Gaultney et al. 1982). Schuler & Lowery (1986) observaram diminuição de 40 % na produtividade de milho em função da compactação do subsolo em um solo argilo siltoso e Voorhees et al. (1989) verificaram redução de 30 % na produtividade de milho em função da compactação do subsolo.

A dificuldade dessas plantas para desenvolverem-se em solos compactados pode estar relacionada ao sistema radicular ser mais sensível à

deficiência de oxigênio e à maior RP, proporcionado pelos altos valores de Ds na camada compactada. Em três anos de experimento e em dois sistemas de manejo do solo (preparo reduzido com grade e plantio direto), Busscher et al. (2001) verificaram que a produtividade de milho foi reduzida em até $2,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ para cada MPa de aumento nos valores médios de RP no perfil de 50 cm de um solo franco arenoso.

A diminuição da compactação, medida pela RP, Ds e macroporosidade, do maior EC para o menor EC ou mesmo, a área escarificada, beneficiou a produtividade do trigo e do milho. Indicando que prejuízos em rendimento provocados pela compactação ocorrem nas lavouras do RS, principalmente em solos muito argilosos e estratégias de manejo do solo devem ser adotadas para manter a produtividade das lavouras.

Comparando a produtividade de trigo, soja e milho nos dois tipos de solos, o Latossolo Vermelho distroférico típico sempre apresentou menor produtividade do que o Latossolo Vermelho distrófico. Essa variação de produtividade foi uma integração de fatores climáticos e de manejo do solo. No Latossolo Vermelho distrófico o plantio direto é realizado há 14 anos e possui um esquema de rotações de culturas que uma cultura não repete a mesma área na safra seguinte, enquanto que no Latossolo Vermelho distroférico típico o plantio direto é realizado há 7 anos e, a rotação de culturas é realizada de forma menos intensa. Ainda, a diferença de produtividade entre os dois locais pode ser atribuída a melhor agregação e qualidade de poros no Latossolo Vermelho distrófico.

Se compararmos a ocorrência de camadas de impedimento ao desenvolvimento radicular entre sistemas de manejo do solo, nota-se que no plantio direto a camada de maior impedimento ao desenvolvimento radicular situa-se na profundidade de 8 a 15 cm e, no preparo convencional, geralmente a camada de maior impedimento ocorre em profundidade abaixo da camada arável (20 cm), formando o chamado “pé-de-arado”. Ambas são prejudiciais, porém, no plantio direto, as raízes ficam confinadas em um menor volume de

solo do que no convencional, tornando-as mais suscetíveis às variações climáticas e dependentes de água e nutrientes neste menor volume de solo.

A avaliação da distribuição do sistema radicular da soja no Latossolo Vermelho distrófico não mostrou diferença na densidade de comprimento radicular entre o maior EC e o menor EC (Figura 42). Metade da densidade de comprimento radicular ficou confinada na camada de 0 a 7,5 cm. A soja possui o sistema radicular do tipo pivotante, mais agressivo que o sistema radicular de gramíneas e, independente do estado de compactação em que a soja se desenvolveu no ano agrícola de 1999/2000.

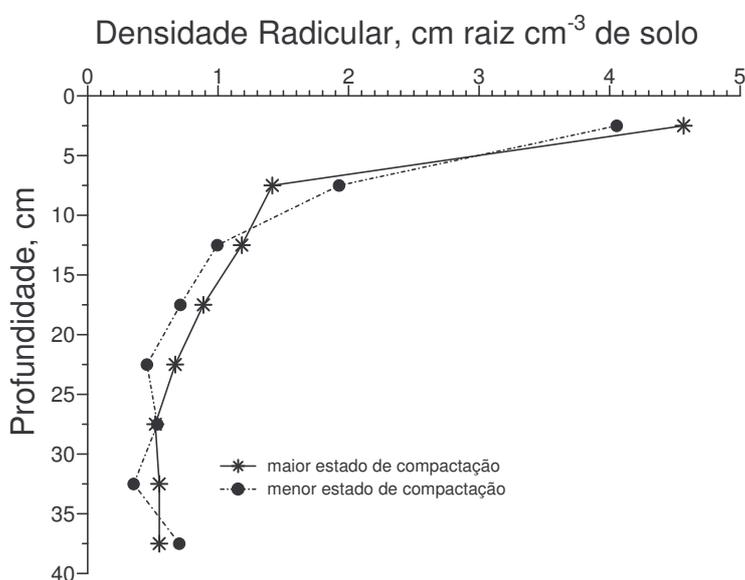


FIGURA 42. Densidade de raízes de soja ao longo da profundidade, no Latossolo Vermelho distrófico na safra de 1999/2000.

Resultados obtidos por Silva et al. (2000c) também indicaram que 50 % da densidade de comprimento radicular do milho ficaram concentradas na camada de 0 a 7,5 cm, tanto para área pastejada como não pastejada. No preparo convencional pastejado e não pastejado, apenas 20 % da densidade de comprimento radicular foi observado na camada superficial. Contudo, Merten & Mielniczuk (1991) determinaram que, 70 a 80 % da massa total de raízes de soja, milho, aveia preta e trigo estavam confinadas nos 10 cm superficiais, independentemente do sistema de manejo do solo num Latossolo

Vermelho distroférico típico. Queiroz-Voltan et al. (2000) analisando aspectos morfológicos da estrutura da raiz de duas cultivares de soja em um Latossolo Vermelho distroférico típico compactado artificialmente até a Ds de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$, não observaram alterações na estrutura anatômica das raízes e na produtividade soja. Segundo Stone et al. (1976), o aprofundamento do sistema radicular é importante em lavouras não irrigadas e pequenas partes do sistema radicular nas camadas mais profundas do perfil seriam suficientes para o suprimento hídrico da soja.

CONCLUSÕES

Nos dois latossolos, identificou-se uma camada compactada entre 7 e 15 cm de profundidade, identificada, principalmente, pelos valores de resistência à penetração, pelos valores de macroporosidade e pela densidade do solo.

Em comparação à densidade do solo, a resistência à penetração teve maior sensibilidade em identificar áreas e camadas compactadas do que a densidade do solo.

A estrutura da camada compactada possui aspecto maciço e laminar, indicativo de compactação provocado por tráfego de máquinas. A metodologia de determinação do diâmetro médio geométrico de agregados estáveis em água não foi um bom parâmetro para identificação de áreas compactadas.

A produtividade da cultura do trigo foi reduzida em 18 % ou 420 kg ha^{-1} e 34 % ou 640 kg ha^{-1} no maior estado de compactação em relação ao menor estado de compactação, no Latossolo Vermelho distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico típico, respectivamente. A produtividade do milho foi reduzida em 16 % ou 1490 kg ha^{-1} no intermediário estado de compactação em relação à área escarificada no Latossolo Vermelho distrófico. No Latossolo Vermelho distroférico típico, a redução de produtividade do milho foi de 38 % ou 2780 kg ha^{-1} no maior estado de compactação em relação à área escarificada. A produtividade da soja não foi sensível a variações no estado de compactação.

A escarificação é uma prática agrícola que pode ser utilizada para diminuir o estado de compactação em lavouras sob plantio direto, ocasionando incremento de produtividade de grãos de milho.

CAPÍTULO 5. INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO, TEMPERATURA DO SOLO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO EM TRÊS SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO.

RESUMO

Os sistemas de preparo do solo afetam a produção das culturas de uma maneira complexa, envolvendo diferentes alterações na sua estrutura, modificando relações de porosidade, resistência mecânica à penetração, conteúdo de água e temperatura do solo, entre outras propriedades. Os objetivos deste estudo foram: (i) medir a temperatura do solo em três sistemas de manejo; (ii) determinar o efeito do revolvimento do solo na diminuição da resistência à penetração e, (iii) relacionar a produtividade do feijoeiro com a quantidade de dias que o solo permaneceu com umidade fora do intervalo hídrico ótimo (IHO). Determinações de resistência mecânica à penetração e umidade volumétrica foram realizadas a cada três dias e a temperatura do solo a cada 30 minutos durante todo o ciclo do feijoeiro em um Argissolo Vermelho-Amarelo, localizado em Santa Maria sob plantio direto, preparo reduzido e preparo convencional. Avaliou-se a distribuição do sistema radicular e a produtividade do feijoeiro. Monitorou-se a quantidade de dias em que cada sistema de cultivo apresentava umidade fora das condições ótimas para o desenvolvimento das plantas, utilizando o limite superior e o limite inferior definidas pelo IHO no capítulo 2. O preparo convencional de solo apresentou as maiores temperaturas do solo e a maior amplitude diária, nas profundidades de 2,5 cm e 10 cm. Na camada de 5 cm a 10 cm é verificada uma camada de maior densidade do solo no plantio direto, comparado aos demais manejos do solo. A densidade do solo na profundidade de 5 cm foi de $1,72 \text{ Mg m}^{-3}$ no plantio direto, $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ no preparo reduzido e $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ no preparo convencional. Na camada de 6-10 cm, a resistência à penetração foi acima de 2 MPa para o plantio direto dos 30 dias após a semeadura até o final do ciclo do feijoeiro. Na profundidade de 12-20 cm, as oscilações de umidade do solo

provocavam períodos em que todos os tratamentos estavam com resistência à penetração inferior a 2 MPa e, à medida que o solo secava, os valores de resistência à penetração retornava para 2 MPa. Comparativamente, visualizou-se melhor distribuição de raízes do feijoeiro no plantio convencional, intermediário no preparo reduzido e menor no plantio direto. A quantidade de dias em que o feijoeiro permaneceu com umidade do solo fora das condições ideais foi de 18 dias para o plantio direto, 19 dias para o preparo convencional e 13 dias para o preparo reduzido. A produtividade de grãos não diferiu entre os sistemas de cultivo.

INTRODUÇÃO

No ano 2000, o Brasil produziu 3 milhões de toneladas de feijão, em uma área de 4,4 milhões de ha, totalizando um rendimento médio de 698 kg ha⁻¹. A produtividade média do Brasil é considerada baixa devido ao baixo nível tecnológico na maioria das unidades produtoras; porém, pode-se alcançar rendimentos acima de 3000 kg ha⁻¹ em lavouras irrigadas e com alto nível tecnológico. O feijoeiro é bastante sensível a variações climáticas que ocorrem nas diferentes regiões produtoras do País. O feijão é sensível à falta de água durante o período de desenvolvimento, principalmente nos estádios reprodutivos e é sensível a altas temperaturas do ar no período de floração. A temperatura média do ar para o desenvolvimento do feijoeiro situa-se entre 15°C e 29°C (CEPEF, 2000), sendo que temperaturas superiores a 29°C podem provocar o abortamento de flores, queda de vagens jovens e reduzir o número de grãos, enquanto que temperaturas inferiores a 12°C podem dificultar a formação e o enchimento de grãos.

Em média, o ciclo do feijoeiro é de 90 dias, exigindo uma média de 300 mm de água em todo o ciclo, tendo uma necessidade média diária de 3,5 mm (CEPEF, 2000). O feijoeiro não tolera excesso e/ou deficiência hídrica durante o florescimento pode provocar perdas de até 60 % no rendimento de grãos.

A proteção da superfície do solo pela palha de culturas anteriores protege o solo contra o aquecimento excessivo, o qual é comum ocorrer nos meses de novembro a janeiro, coincidindo com a época de semeadura de diversas culturas no RS. Estudos realizados no norte dos Estados Unidos indicam que a cobertura do solo pela palha reduziu a temperatura do solo em 2 °C e que prejudicou a produtividade de diversas culturas, enquanto que, em regiões mais quentes dos Estados Unidos, o efeito da diminuição da temperatura do solo foi benéfico para as plantas (Zobel, 1992). Johnson & Lowery (1984) verificaram diferença de cerca de 6 °C a menos para o plantio direto comparado ao preparo convencional, na profundidade de 5 cm em solo siltoso no estado de Wisconsin-USA. Azooz et al. (1995), em solo siltoso em Wisconsin-USA, verificaram menores temperaturas no plantio direto do que no preparo convencional e resultou em menor quantidade de dias para a emergência das plântulas de milho no plantio direto. Em regiões subtropicais, Salton & Mielniczuck (1995) verificaram menores temperaturas máximas e menor amplitude diária da temperatura do solo a 5 cm de profundidade para o plantio direto quando comparado com o preparo convencional e preparo reduzido em um Argissolo Vermelho distrófico.

O sistema de preparo do solo além de afetar a quantidade de palha depositada na superfície, modifica a densidade e porosidade, a quantidade de água, o teor de matéria orgânica e a estrutura do solo, dentre outros. Tais alterações conduzem a uma dinâmica de temperatura do solo que influencia no desenvolvimento das plantas. No plantio direto, a ausência de revolvimento acaba provocando um maior estado de compactação do que lavouras que receberam algum tipo de revolvimento do solo. Diversos autores encontraram maior conteúdo de água no plantio direto quando comparado com o preparo convencional (Sidiras et al., 1984; Voorhees et al., 1989; Datiri & Lowery, 1991; Salton & Mielniczuck, 1995). O maior conteúdo de água no solo sob plantio direto deve-se à proteção da palha na superfície do solo contra o aquecimento que provoca a evaporação, aliada com o maior conteúdo de matéria orgânica e maior densidade do solo. Este último provoca maior retenção de água a

potenciais mais negativos (Wu et al., 1992). Johnson et al. (1984) verificaram maior umidade volumétrica na zona radicular no plantio direto comparada com o preparo convencional, fato atribuído à cobertura do solo maior no plantio direto.

A compactação da subsuperfície do solo provocou uma redução de 12 % a 23 % na produtividade de trigo em um solo argilo siltoso do Marrocos. Em clima semi-árido e tropical, a conservação da umidade do solo é uma questão crítica na produção de grãos e o plantio direto e preparo reduzido são eficientes em reduzir as perdas de água por evaporação do solo pela proteção da superfície pelos resíduos culturais (Azooz et al., 1995) além de diminuir a quantidade de radiação solar incidente e, conseqüentemente, reduzir a temperatura do solo.

As raízes das plantas apresentam diferentes graus de tolerância à compactação. De maneira generalizada, as plantas respondem a valores críticos que restringem o seu crescimento. Na literatura existe divergência de opiniões e de variáveis quanto ao limite crítico de resistência mecânica à penetração limitante para o desenvolvimento radicular. Cintra & Mielniczuk (1983) verificaram redução de 50 % no comprimento radicular de várias espécies quando a RP foi de 1,1 MPa, em camadas compactadas artificialmente em um Latossolo Vermelho distrófico. Hakansson (1992) considera como valor crítico a RP entre 2 e 3 MPa, Taylor et al. (1966) considera como crítico a RP de 2 MPa e Merotto & Mundstock (1999) considera como crítica a RP de 3,5 MPa. Em geral, considera-se o valor de 2 MPa como limitante ao crescimento radicular (Taylor et al., 1966; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999).

O mecanismo de resposta das plantas à condição de maior impedimento físico do solo ao crescimento das raízes é bastante complexo. Rosolem et al. (1999) verificaram que a RP onde o crescimento do sistema radicular foi reduzido pela metade foi de 0,33 MPa para as raízes primárias e de 1,33 MPa para as raízes adventícias em plântulas de milho. Em condições ótimas de água no solo, os valores médios da pressão máxima que as raízes de ervilha

cessam o seu crescimento está entre 0,9 MPa e 1,3 MPa (Whiteley et al., 1982). Essas pressões estão fortemente associados com a pressão de turgor dos vacúolos das células meristemáticas da raiz (Taylor & Ratliff, 1969).

Em área de integração lavoura-pecuária, num Argissolo Vermelho, o plantio direto apresentou menor densidade radicular do que o preparo convencional, correlacionando-se negativamente com a densidade do solo, que foi maior no plantio direto na camada entre 5 a 15 cm (Silva et al., 2000c). Porém, a produtividade de grãos de milho e de silagem não diferiu entre os sistemas de manejo do solo, indicando que o estado de compactação alcançado não foi limitante para restringir a produtividade do milho. Barber (1971) e Mello Ivo & Mielniczuk (1999) observaram maior produção de raízes em plantio direto do que no preparo convencional somente nos primeiros 15 cm do solo.

Abreu (2000) não encontrou diferenças na produtividade de soja entre o plantio direto e o preparo reduzido, apesar de ter verificado maior crescimento inicial da soja no preparo reduzido em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Silva et al. (2000c) também não verificaram diferenças de produtividade de soja entre o plantio direto e o preparo reduzido num Latossolo Vermelho distrófico, embora houvesse diferenças de RP e Ds entre os dois sistemas de manejo do solo. Nessas situações, a diminuição do estado de compactação pelo preparo reduzido não aumentou a produtividade da soja, tanto para um solo arenoso como para um argiloso.

A resposta das plantas à subsolagem é uma função de vários fatores correlacionados (Oussible & Crookston, 1987). O primeiro é a destruição da camada compactada que restringe e confina o crescimento e a distribuição do sistema radicular, limita a infiltração de água e as trocas gasosas. O segundo, é o tempo que a estrutura do solo suporta as pressões e não compacta-se novamente durante a estação de crescimento da planta.

A hipótese desse estudo fundamenta-se que o aumento do estado de compactação, avaliado pela densidade do solo, diminui a amplitude do intervalo

hídrico ótimo e as plantas permanecem submetidas a maiores períodos (dias) em condições de umidade do solo fora do intervalo hídrico ótimo.

Os objetivos deste estudo foram: (i) medir a temperatura do solo em três sistemas de manejo do solo; (ii) determinar o efeito do revolvimento do solo na diminuição da resistência à penetração e, (iii) relacionar a produtividade do feijoeiro, em três sistemas de manejo do solo, com a quantidade de dias que o solo permaneceu com umidade fora dos limites críticos estimados pelo intervalo hídrico ótimo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Solos, CCR, UFSM, localizado na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, latitude 29°41' sul, longitude de 53°48' oeste e altitude de 95 metros.

O clima da região enquadra-se na classificação "Cfa" de Köppen, ou seja, 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-Amarelo distrófico arênico (EMBRAPA, 1999).

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com os seguintes tratamentos de manejo do solo: plantio direto (PD); preparo convencional (PC) e preparo reduzido (PR), distribuídos em quatro blocos. A área experimental vinha sendo conduzida sob plantio direto há cinco anos com culturas de soja ou milho no verão e trigo ou aveia no inverno. No inverno de 2001, toda a área do experimento estava coberta com aveia preta, a qual foi dessecada no pleno florescimento e proporcionou cobertura morta para o plantio direto. O preparo convencional caracterizou-se por uma aração a 30 cm e uma gradagem superficial e no preparo reduzido foi realizado somente uma escarificação a 30 cm de profundidade, com escarificador de 3 hastes, espaçadas de 40 cm. O revolvimento do solo ocorreu 15 dias antes da semeadura do feijão.

Cultivou-se feijão preto, cultivar FT-NOBRE, a semeadura foi realizada no dia 23/11/2001, com espaçamento entre linhas de 0,45 metros e adubação de base de 400 kg ha⁻¹ da fórmula 5-20-20. A semeadora-adubadora, marca Sfill-Stara, possuía discos de corte e a profundidade de semeadura foi de 7 cm.

A adubação nitrogenada em cobertura foi realizada aos 30 dias após a emergência das plantas, em torno de 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio na forma de uréia. Realizaram-se duas aplicações de graminicida e o controle de folhas largas foi realizado com capina manual. Foram realizadas duas aplicações de fungicidas e duas de inseticida.

Um dia após a semeadura do feijão, foram instalados termopares para determinação da temperatura do solo nas profundidades de 2,5 e 10 cm, ambos na entre linha da cultura e, um termopar na altura de 30 cm para determinação da temperatura do ar. Também instalou-se um pluviômetro para o registro da precipitação. Os termopares e o pluviômetro estavam conectados a um armazenador eletrônico de dados, que foi programado para realizar leituras diárias de temperatura a cada 10 minutos e gravar a média de temperatura a cada 30 minutos.

A emergência das plântulas de feijoeiro aconteceu, em média, no dia 28/11/2001, cinco dias após a semeadura. A quantidade de chuvas nos primeiros 15 dias após a semeadura foi adequada para a emergência das plântulas (Figura 43).

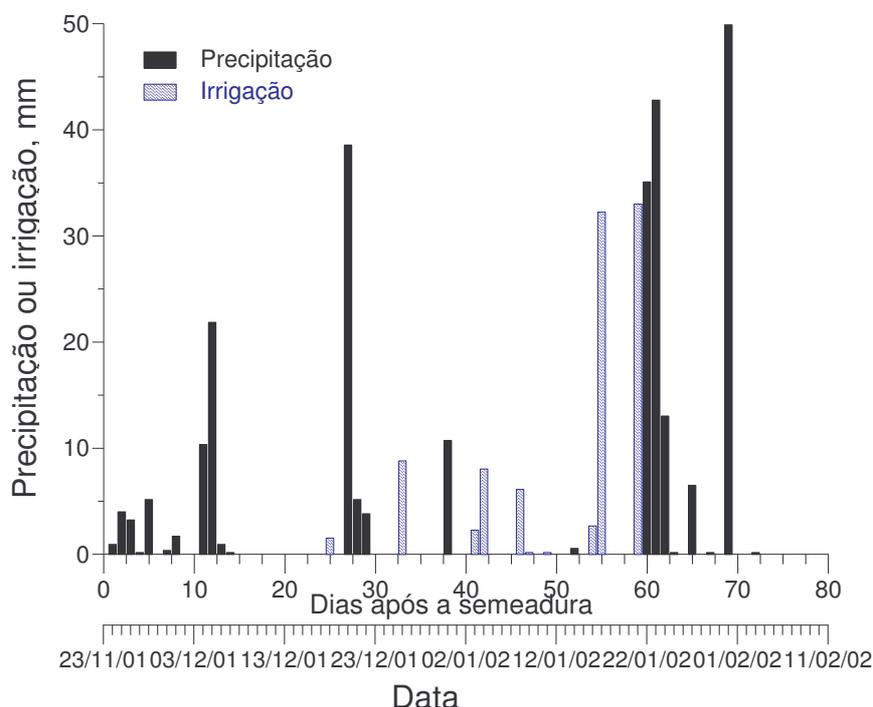


FIGURA 43. Valores de precipitação mais irrigação durante o ciclo da cultura do feijoeiro.

A área experimental possuía um sistema de irrigação por aspersão, o qual era acionado quando a quantidade de água no solo era insuficiente para o adequado desenvolvimento do feijoeiro. O primeiro evento de irrigação foi realizado dia 18 de dezembro de 2001 e no dia 22 de dezembro de 2001 ocorreu à última chuva do ano 2001 (Figura 43). O período de florescimento do feijoeiro coincidiu com o período de maior deficiência hídrica no local do experimento e a irrigação fez-se necessária, pois o período do florescimento é a fase fenológica mais crítica para a cultura do feijão. O feijoeiro atingiu o estágio de florescimento no dia 30 de dezembro de 2001, entre o dia 27 de dezembro e o dia 22 de janeiro foram realizadas 6 irrigações, totalizando 84,86 mm.

A umidade volumétrica do solo foi determinada com refletômetro de domínio de tempo (TDR), em quatro profundidades, 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm. Utilizaram-se hastes fixas de 23 cm, inseridas no solo com

ângulo de acordo com a espessura da camada avaliada. As hastes permaneceram inseridas no solo durante todo o ciclo da cultura do feijoeiro.

A resistência mecânica à penetração (RP) foi determinada até a profundidade de 40 cm, com um penetrógrafo manual (Rimik CP 20), ponta cônica de 30° e base de 12,83 mm de diâmetro. Os valores de RP a cada 1,5 cm eram gravados num armazenador de dados do próprio penetrógrafo e em laboratório, os dados eram transferidos para um microcomputador.

No pleno florescimento do feijoeiro, em torno de 35 dias após a semeadura (23/01/2002), abriram-se trincheiras de 0,45 m de largura por 0,40 cm de profundidade para avaliação da distribuição do sistema radicular, mediante desenhos e fotografias. A avaliação da produtividade foi realizada no dia 12/02/2002, quando as plantas alcançaram a maturação fisiológica, colhendo-se uma área de 1,35 m².

A densidade do solo foi realizada na época do florescimento do feijoeiro, coletando-se cilindros de 5 cm de diâmetro por 3 cm de altura, inseridos lateralmente em pequenas trincheiras, nas profundidades de 0-5 cm; 5-10 cm; 10-15 cm; 15-20 cm; 20-25 cm e 25-30 cm.

A análise estatística foi realizada pelo teste da diferença mínima significativa (DMS), utilizando o pacote estatístico SAS (Statistical Analysis System, 1985).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temperatura do solo em três sistemas de manejo do solo

A temperatura máxima do solo durante todo o ciclo do feijoeiro, na profundidade de 2,5 cm foi de 36,2 °C no plantio direto, de 42,2 °C no plantio convencional e de 43,7 °C no preparo reduzido (Tabela 10). Na profundidade de 10 cm, o preparo convencional apresentou maior temperatura máxima (43,4 °C) e foi estatisticamente diferente dos outros sistemas de manejo do solo. No

preparo convencional, foram verificadas as menores temperaturas mínimas do solo, tanto na profundidade de 2,5 cm e na profundidade de 10 cm. As temperaturas mínimas diárias, na profundidade de 2,5 cm, mostraram pequenas oscilações entre os tratamentos, ficando entre 19,2 °C no plantio direto, 17,3 °C no preparo reduzido e 16,9 no preparo convencional, porém os valores diferiram entre as profundidades e entre os sistemas de manejo do solo.

TABELA 10. Temperatura máxima, mínima e amplitude térmica em duas profundidades e em diferentes sistemas de manejo do solo.

Tratamento	Profundidade cm	T _{max}	T _{min}	Amplitude
		°C		
Plantio direto	2,5	36,2 Aa	19,2 Ba	17,0
	10	34,8 Ab	20,2 Aa	14,7
Preparo convencional	2,5	42,2 Aa	16,9 Bb	25,2
	10	43,4 Aa	18,4 Ab	25,0
Preparo reduzido	2,5	43,7 Aa	17,3 Aab	26,4
	10	38,3 Ab	19,6 Aa	18,7

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na coluna, comparam profundidade dentro de cada sistema de manejo do solo e médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, comparam os sistemas de manejo do solo dentro de cada profundidade, não diferem entre si pela DMS (P < 5 %).

Ao contrário de climas temperados onde o aquecimento do solo é desejável para proporcionar temperaturas adequadas a emergência das sementes, em climas tropicais e subtropicais o super aquecimento do solo pode prejudicar a germinação e emergência das plântulas. Azooz et al. (1995), em solo siltoso de Wisconsin-USA, verificaram menor período para a emergência de plântulas de milho no preparo convencional do que no plantio direto com cobertura do solo de 91%, e não verificaram diferenças na taxa de emergência entre o preparo convencional e o plantio direto quando foi retirado a palha de 15 cm de cada lado da linha de semeadura.

No preparo convencional foram verificadas as menores temperaturas mínimas do solo, tanto na profundidade de 2,5 cm e na profundidade de 10 cm. As temperaturas mínimas diárias na profundidade de 2,5 cm mostraram

pequenas oscilações entre os tratamentos, ficando entre 19,2 °C no plantio direto, 17,3 °C no preparo reduzido e 16,9 °C no preparo convencional, porém, os valores diferiram entre as profundidades e entre os sistemas de manejo do solo.

Na profundidade de 2,5 cm, a amplitude térmica foi de 25,2 °C no preparo convencional e de 26,4 °C no preparo reduzido durante todo o ciclo do feijoeiro. O arado de discos e a escarificação incorporaram os restos culturais da aveia, deixando o solo descoberto e isso provocou um maior aquecimento do solo durante o dia e um maior resfriamento durante a noite (Figura 44). Tais resultados concordam com os obtidos por Salton & Mielniczuk (1995), estudando os mesmos sistemas de manejo do solo em um Argissolo Vermelho em Eldorado do Sul (RS).

A 10 cm de profundidade, o maior aquecimento diurno e resfriamento noturno ocorreu, principalmente, quando o feijoeiro ainda não sombreava totalmente o solo (Figura 44) e, à medida que as plantas foram se desenvolvendo, a amplitude térmica a 10 cm foi sendo reduzida. A cobertura do solo exerce grande e importante influência na temperatura do solo, pois, depende da capacidade de refletir a radiação solar, com a natureza, coloração e quantidade sobre o solo, além do ângulo de incidência e da intensidade dos raios solares. As maiores amplitudes foram até os 60 dias após a semeadura, em virtude das plantas de feijão ainda não sombrearem totalmente a superfície do solo.

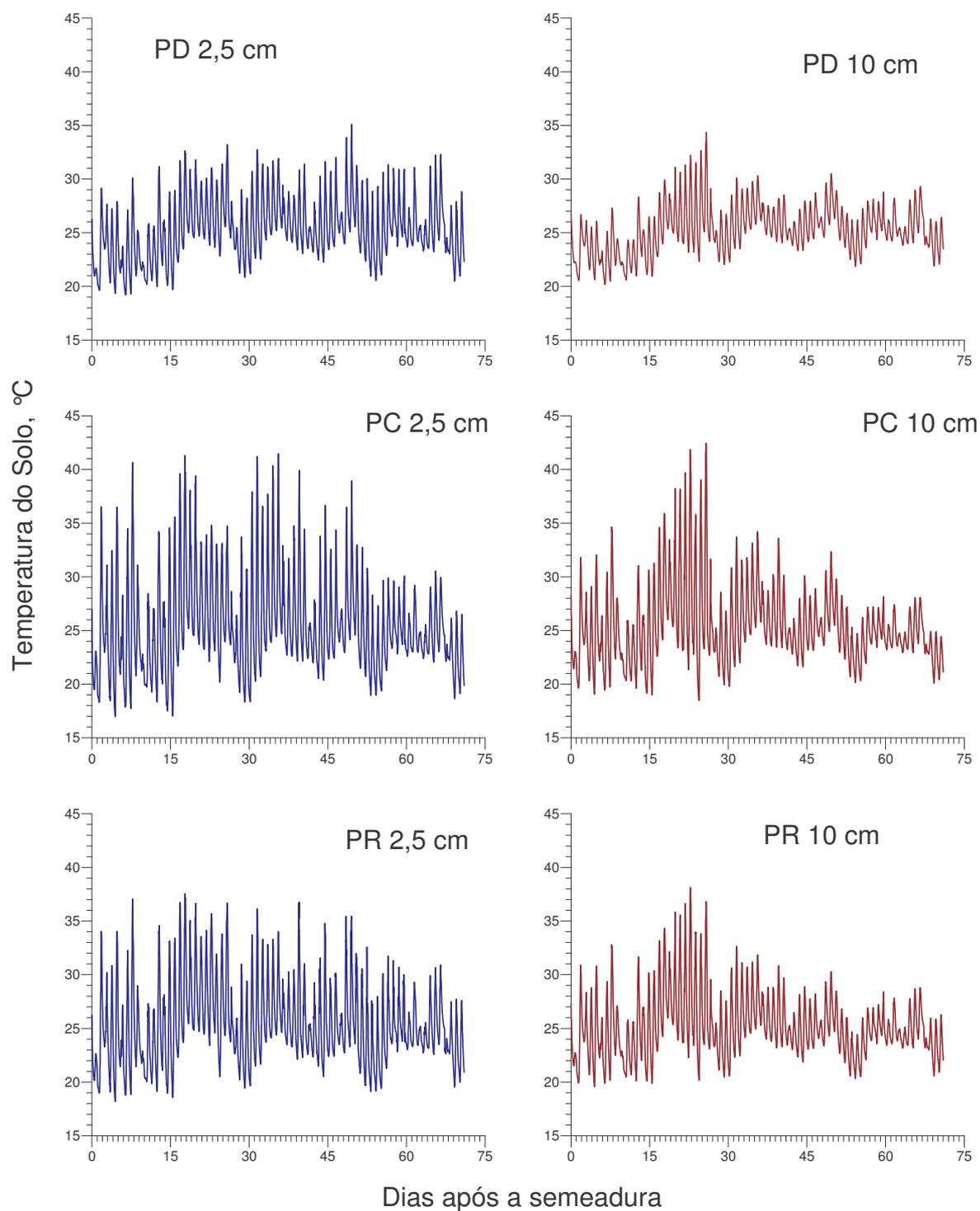


FIGURA 44. Valores de temperatura do solo durante o ciclo do feijoeiro em três sistemas de manejo do solo. (PD= plantio direto; PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido)

Para avaliar o efeito dos sistemas de manejo nos dias ensolarados, escolheram-se os dias 02/12/2001 (4 dias após a emergência) e o dia 01/01/2002 (35 dias após a emergência), ambos com período de 12 horas de sol. No dia 02/12/2001, a temperatura máxima do ar foi de 37 °C e a 2,5 cm de profundidade foi de 41 °C no preparo convencional e 30 °C no plantio direto. As temperaturas máximas foram verificadas às 15 horas. Nesse mesmo dia, na profundidade de 10 cm a temperatura máxima no plantio convencional foi de 34 °C e no plantio direto, de 26 °C (Figura 42). O preparo reduzido apresentou comportamento intermediário entre o preparo convencional e o plantio direto.

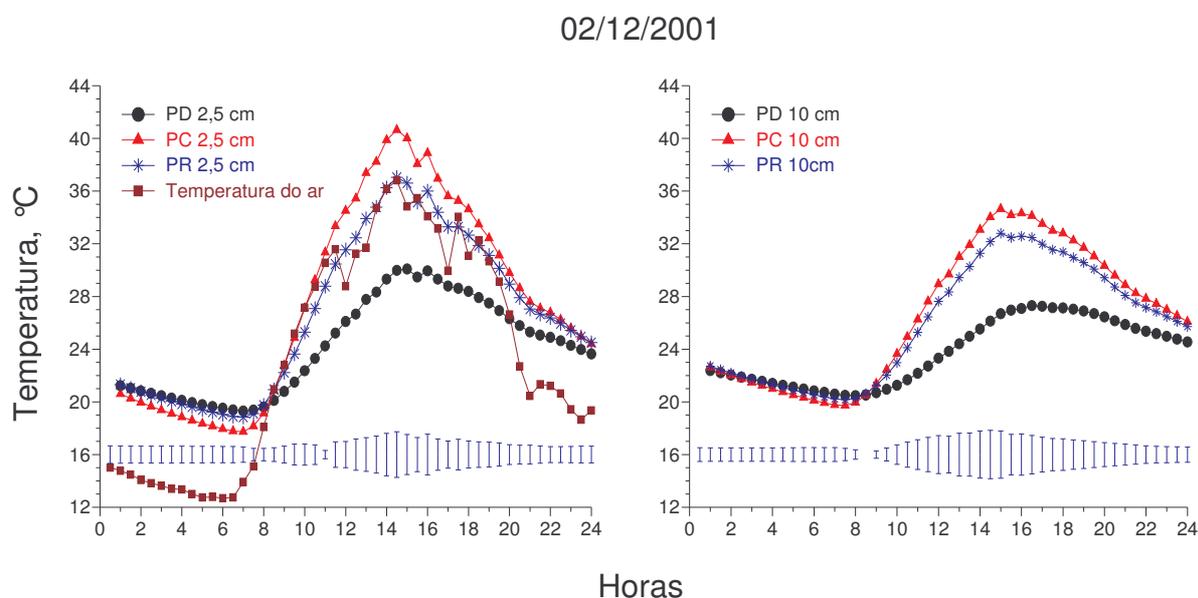


FIGURA 45. Variação da temperatura diária do ar e do solo para o dia 02/12/2001, 4 dias após a emergência do feijoeiro, em três sistemas de manejo do solo. (PD= plantio direto; PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido)

Em outro dia com 12 horas de sol, dia 01/01/2002, cerca de 35 dias após a semeadura quando as plantas de feijão já estavam em pleno crescimento vegetativo, percebe-se uma diminuição da temperatura máxima do solo, enquanto que a temperatura do ar foi similar ao dia 02/12/2001, próxima de 37 °C (Figura 46). As diferenças de temperatura do solo entre os sistemas de preparo do solo foram minimizadas pelo dossel do feijoeiro, mas ainda o

preparo convencional apresentou maior temperatura do que o plantio direto (Figura 46). Na profundidade de 10 cm, não houve diferenças entre os sistemas de manejo do solo.

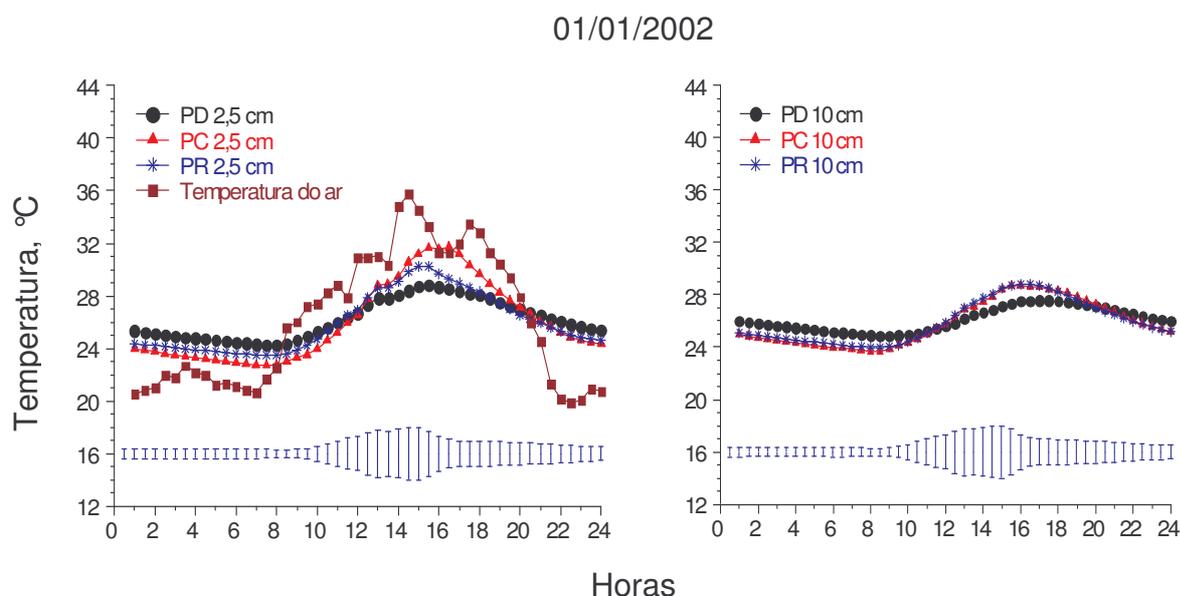


FIGURA 46. Variação da temperatura diária do ar e do solo para o dia 01/01/2002, 35 dias após a emergência do feijoeiro, em três sistemas de manejo do solo. (PD= plantio direto; PC= preparo convencional; PR= preparo reduzido)

Densidade do solo e resistência mecânica à penetração de raízes

A densidade do solo na camada de 0-5 cm foi de $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ para o plantio direto, $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para o preparo convencional e $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ para o preparo reduzido (Figura 47). Na camada de 5-10 cm, o revolvimento no preparo convencional reduziu a Ds para valores de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que o plantio direto apresentava Ds de $1,72 \text{ Mg m}^{-3}$. O revolvimento do solo foi eficiente em reduzir a Ds na profundidade de 7,5 cm, que geralmente é a camada do solo que sofre maior compactação no plantio direto (Hakansson et al., 1988; Unger & Jones, 1998; Silva et al., 2000b; Reinert et al., 2001). Embora o revolvimento do solo com arado de discos e grade favoreçam a diminuição da Ds, os fatores como a destruição da estrutura do solo, a

permanência do solo descoberto, o impacto das gotas de chuva e/ou ciclos de umedecimento e secagem agiram rapidamente no sentido de reconsolidar o solo.

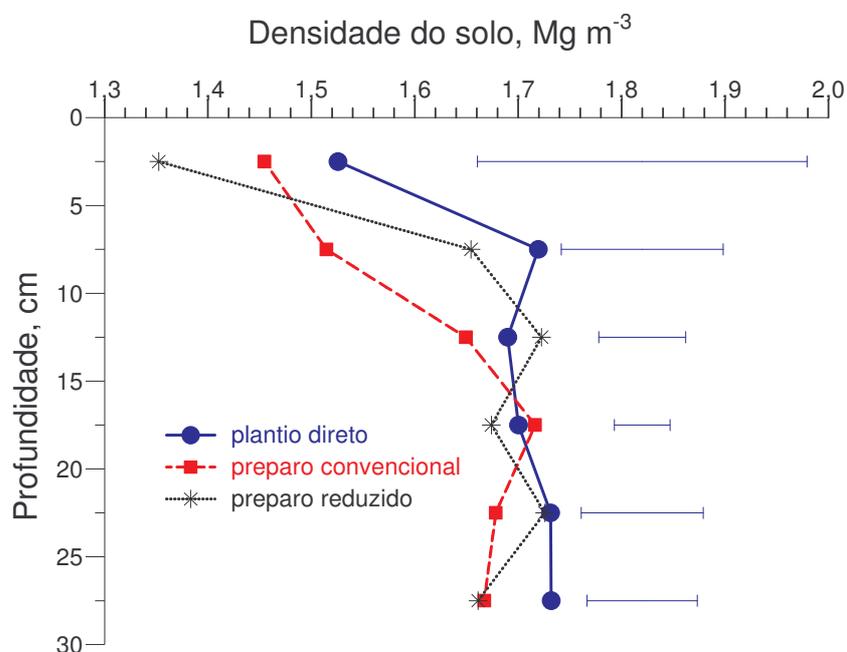


FIGURA 47. Valores de densidade do solo ao longo do perfil do solo nos três sistemas de manejo do solo. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade.

A RP foi maior no plantio direto do que nos demais sistemas de manejo do solo (Figura 48), concordando com resultados apresentados por Abreu (2000), que verificou diminuição da RP no preparo reduzido, embora não tenha verificado diminuição nos valores de D_s , neste mesmo tipo de solo. Na emergência do feijoeiro (28/11/2001), a RP foi menor em todos os sistemas de preparo do solo quando comparada com todo o ciclo do feijoeiro, indicando boas condições para a emergência das plântulas (Figura 48). Tal fato está diretamente relacionado com o conteúdo de água no solo, que foi maior do que nos outros dias.

Nesmith et al. (1987) verificaram maior estado de compactação no plantio direto e no preparo reduzido do que no preparo convencional e a

camada compactada situava-se entre 15 e 25 cm, com valores de RP em torno de 2 MPa e Ds acima de 1,55 Mg m⁻³. Tais resultados concordam com os observados por Ball & O'Sullivan (1982), que verificaram maior RP na camada superficial sob plantio direto do que no preparo convencional e o oposto foi observado em camadas mais profundas do solo.

Em condições de menor umidade do solo, visualiza-se que o efeito do sistema de manejo do solo ainda favorece uma menor RP no sistema com preparo convencional de solo. Os valores de RP no dia 07/01/2002 foram similares nos tratamentos plantio direto e preparo reduzido, com valores médios em torno de 2 MPa, considerado limitante para a maioria das culturas (Taylor et al., 1966, Silva et al., 1994). Analisando os valores de umidade neste dia, percebemos menor valor para o preparo reduzido e valores similares para o plantio direto e o preparo convencional na profundidade de 2,5 a 7,5 cm. Próximo ao final do ciclo do feijoeiro, determinação de RP e umidade volumétrica do solo realizada dia 11/03/2002, a umidade do solo foi igual nas profundidades de 7,5 cm e 17,5 cm, porém a RP foi maior no plantio direto do que nos demais tratamentos. No mês de janeiro de 2002 ocorreram os menores valores de umidade do solo durante o ciclo do feijoeiro, proporcionando um elevado estado de resistência mecânica à penetração que impossibilitou a determinação da RP no período compreendido entre os dias 11/01/2002 a 20/01/2002.

A RP está diretamente correlacionada com o crescimento radicular (Tompson et al., 1987), principalmente, na camada onde o sistema radicular está crescendo. Dentro de várias propriedades do solo que influenciam nos valores de RP, a umidade do solo é a mais variável durante o ciclo das plantas. Por isso, determinações pontuais da RP podem não detectar possíveis limitações às plantas em função de alta RP. Na camada de 3 a 5 cm, verificamos baixa RP do solo, principalmente nos 10 primeiros dias após a emergência (5 dias após a semeadura) das plântulas de feijão (Figura 49). No

decorrer do ciclo, o plantio direto apresentou maior RP, porém inferior a 1,5 MPa.

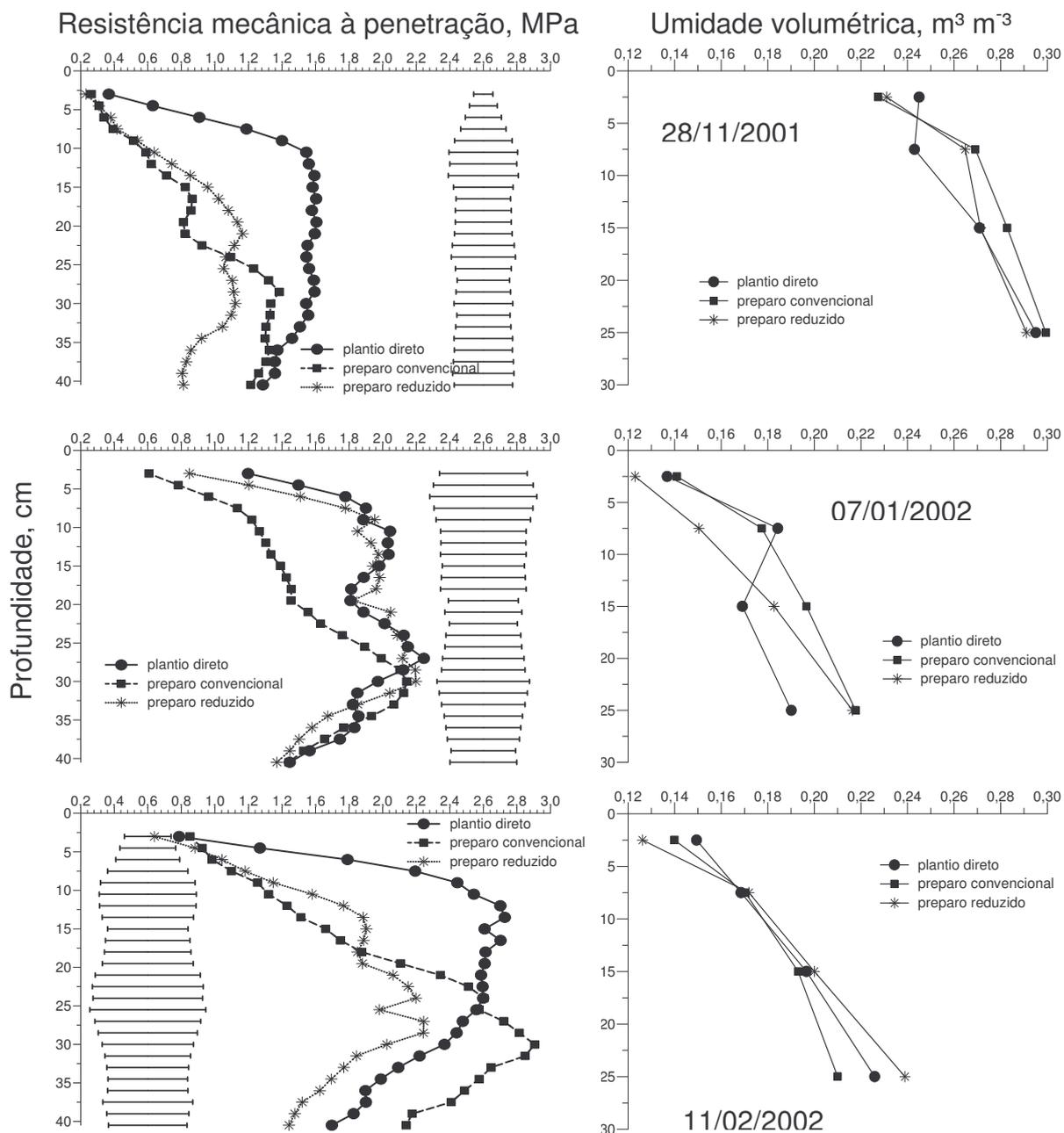


FIGURA 48. Valores de resistência à penetração e umidade volumétrica ao longo da profundidade nos três sistemas de manejo do solo, em três distintos dias. Linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada profundidade.

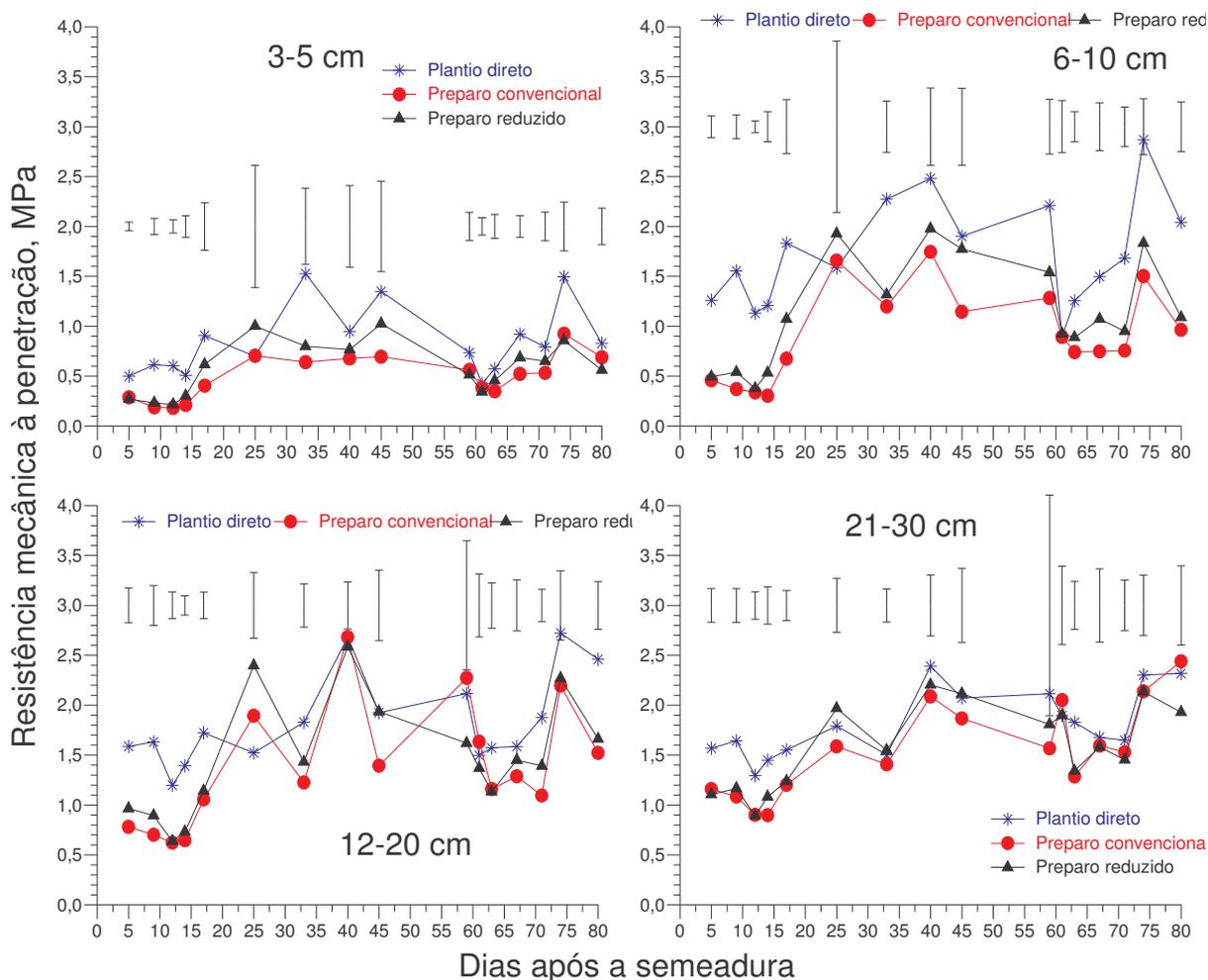


FIGURA 49. Valores de resistência mecânica à penetração ao longo do ciclo do feijoeiro para três sistemas de manejo do solo e quatro profundidades. Linhas verticais indicam a diferença mínima significativa a 5 % de probabilidade (DMS) e comparam médias dos tratamentos em cada dia avaliado.

Na camada de 6-10 cm, o plantio direto apresentou RP próximo a 1,5 MPa na emergência das plântulas, enquanto que os demais sistemas de manejo de solo apresentaram RP em torno de 0,5 MPa. Dos 30 dias até os 60 dias após a semeadura, o plantio direto apresentou RP de 2 MPa, considerado limitante para o crescimento de raízes (Figura 49). Porém, o crescimento radicular é rápido e nos primeiros 10 dias após a emergência as raízes já

ultrapassaram a profundidade de 10 cm (observação visual). De 12-20 cm ocorreram as maiores flutuações de RP devido a variações na umidade do solo, inclusive com RP acima de 2,5 MPa para os três sistemas de manejo do solo.

Na camada de 21-30 cm, ocorreram pequenas variações entre os sistemas de manejo do solo, haja vista que a Ds e a umidade do solo também não apresentavam diferenças entre os sistemas.

As plantas emitem, constantemente, novas raízes e o crescimento radicular é rápido e restrições ao crescimento radicular em função de alta RP (acima de 2 MPa), durante o ciclo do feijoeiro, pode ser verificado na profundidade de 6 a 10 cm, a partir dos 30 dias após a semeadura apenas no plantio direto. Na profundidade de 12 a 20 cm, limitações de RP acima de 2 MPa podem ser visualizadas em todos os sistemas de manejo do solo, apesar de alternar períodos com RP abaixo de 2 MPa, devido a variações no conteúdo de água no solo. Esses períodos com RP inferior ao limitante possibilita as raízes crescerem em profundidade.

Distribuição radicular, limite superior e inferior de umidade do solo e produtividade do feijoeiro

A análise da distribuição radicular no perfil é uma metodologia qualitativa, possuindo grande utilidade na avaliação e identificação de camadas de impedimento mecânico ao crescimento radicular. Os desenhos da distribuição radicular foram realizados na fase fenológica de pleno florescimento das plantas e visualiza-se que as raízes no preparo convencional apresentaram maior quantidade e melhor distribuição lateral e em profundidade do que no plantio direto e preparo reduzido. No plantio direto as raízes concentraram na camada de 5 a 15 cm, porém algumas ultrapassaram a camada compactada e desenvolveram-se em profundidades maiores que 30 cm (Figura 50). No preparo convencional percebe-se que não ocorreram

restrições ao crescimento radicular, pois as raízes distribuíram-se uniformemente nos lados da planta, ocupando todo o volume de solo (Figura 51). No preparo reduzido, as raízes ficaram concentradas até a profundidade de 25 cm (Figura 52).

Resultados semelhantes aos deste estudo foram encontrados por Silva et al. (2000c), que verificaram melhor distribuição espacial de raízes do milho no preparo convencional do que no plantio direto. Em solo argiloso com 2 anos de experimento, (Martino & Shaykewich, 1994) observaram que no preparo convencional o comprimento radicular de trigo foi maior do que o plantio direto. Os autores atribuíram esse menor comprimento radicular no plantio direto às maiores RP da camada de 0 a 10 cm. Salih et al. (1998) também verificaram maior concentração de raízes de algodoeiro na profundidade de 20 a 60 cm no tratamento que recebeu subsolagem.

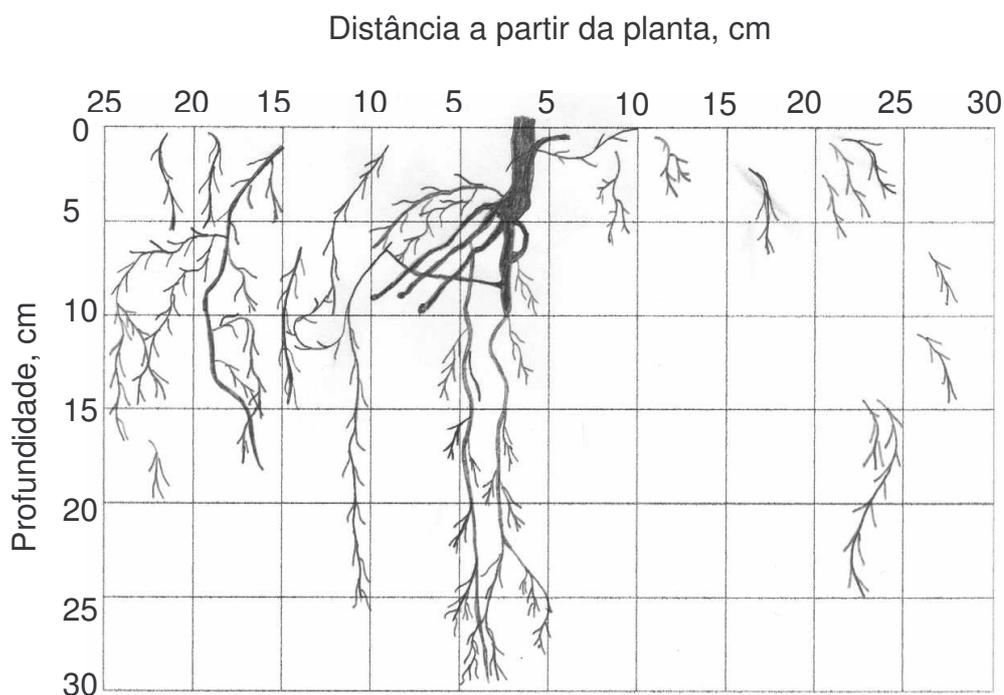


FIGURA 50. Desenho da distribuição do sistema radicular do feijoeiro no plantio direto.

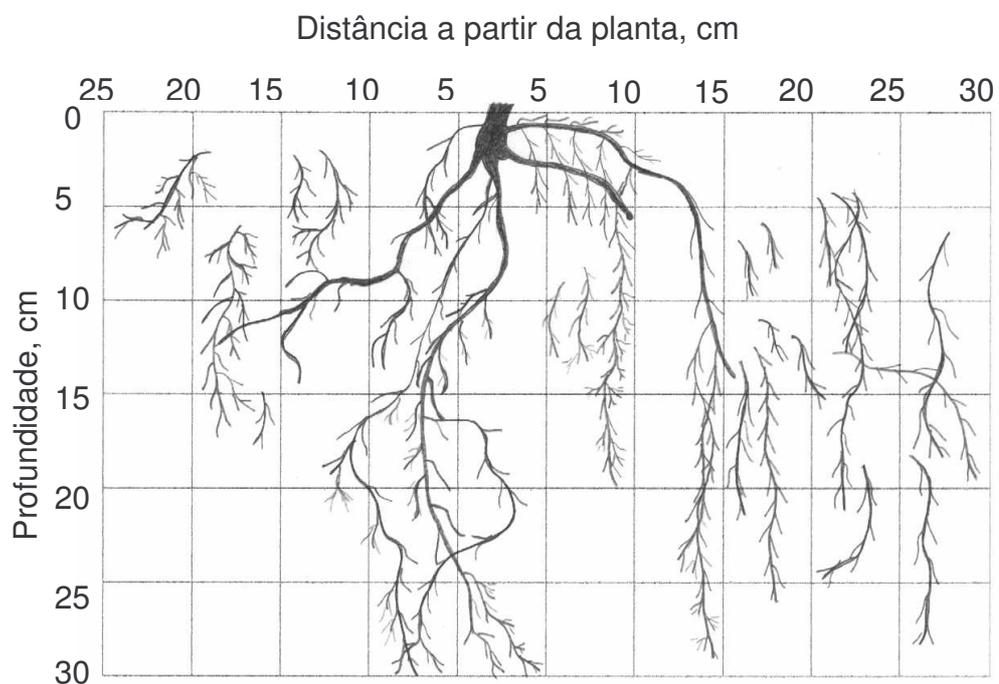


FIGURA 51. Desenho da distribuição do sistema radicular do feijoeiro no preparo convencional de solo.

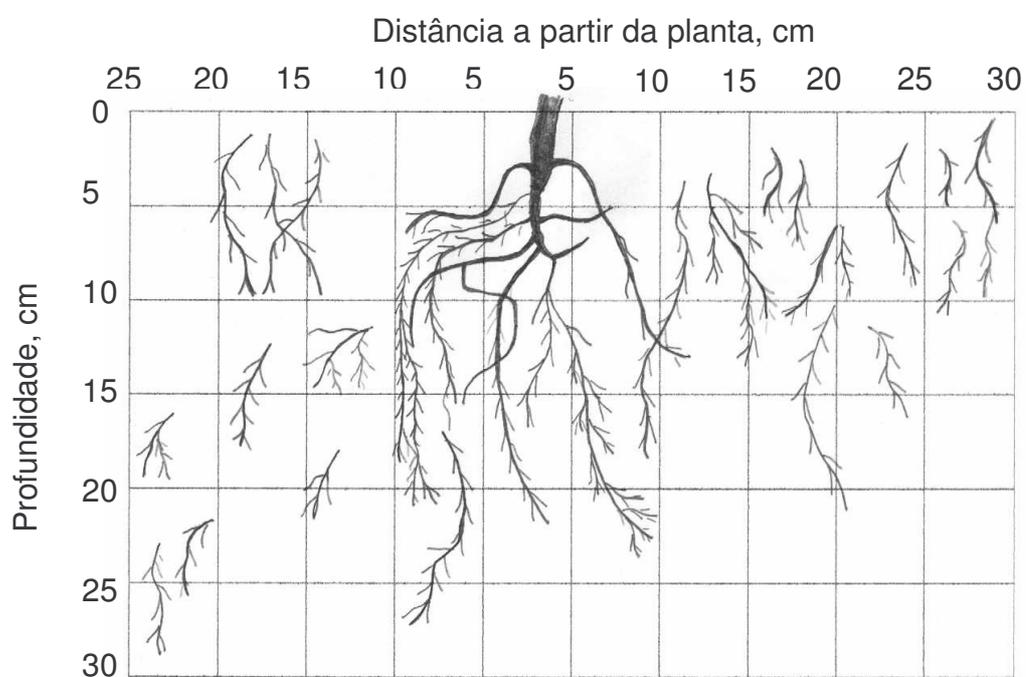


FIGURA 52. Desenho da distribuição do sistema radicular do feijoeiro no preparo reduzido de solo.

Utilizando o conteúdo de água no limite superior e no limite inferior de disponibilidade hídrica, determinado pela metodologia do IHO (Silva et al., 1994) para este solo (Capítulo 2), estimou-se a faixa de umidade onde as condições físicas do solo seriam ideais para a produtividade das plantas, entre o limite inferior (conteúdo de água no solo onde a resistência à penetração foi superior a 2 MPa ou o conteúdo de água no solo no potencial de $-1,5$ MPa) e o limite superior (conteúdo de água no solo quando a aeração foi de 10 % ou o conteúdo de água no solo no potencial de $-0,01$ MPa). A diferença entre o limite superior e o limite inferior do IHO foi de $0,155 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de água para o preparo reduzido, de $0,110 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o preparo convencional e de $0,107 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o plantio direto.

Através do IHO e do monitoramento da umidade volumétrica do solo foi calculado o número de dias em que o feijoeiro permaneceu fora das condições ideais para o seu crescimento e desenvolvimento. Na situação do plantio direto a umidade do solo da emergência do feijoeiro (28/11/2001) até o dia 07/12/2001, permaneceu dentro do IHO em todas as profundidades (Figura 53), enquanto do dia 07/12/2001 até o dia 21/01/2002, a umidade do solo nas camadas de 0-5 cm e de 5-10 cm foi inferior ao limite inferior do IHO, porém, nas profundidades de 10-20 cm e 20-30 cm, o conteúdo de água foi adequado para o desenvolvimento do feijoeiro até o dia 03/01/2002. A partir desse dia, até o dia 21/01/2002 o feijoeiro desenvolveu-se fora das condições ideais estimadas pela metodologia do IHO. Embora pequenas lâminas de água fossem aplicadas pelas irrigações, essas não foram suficientes para elevar a disponibilidade hídrica do solo para patamares acima do limite inferior do IHO, apenas um alívio momentâneo do estresse hídrico para a planta.

Para o preparo convencional, as camadas de 0-5 cm e de 5-10 cm possuíam umidade volumétrica abaixo das condições ideais a partir do dia 07/12/2001, enquanto que as camadas de 10-20 cm e 20-30 cm permaneceram entre os limites críticos do IHO até o dia 02/01/2002 (Figura 54). No preparo reduzido o período em que o feijoeiro ficou fora do IHO foi a partir do dia 08/01/2002 até o dia 21/01/2002 (Figura 55). Em relação ao plantio

direto e ao preparo convencional, o feijoeiro cultivado sob preparo reduzido permaneceu com a umidade do solo entre o limite superior e o limite inferior do IHO 3 dias a mais que o plantio direto e 4 dias a mais que o preparo convencional para sair do limite inferior do IHO.

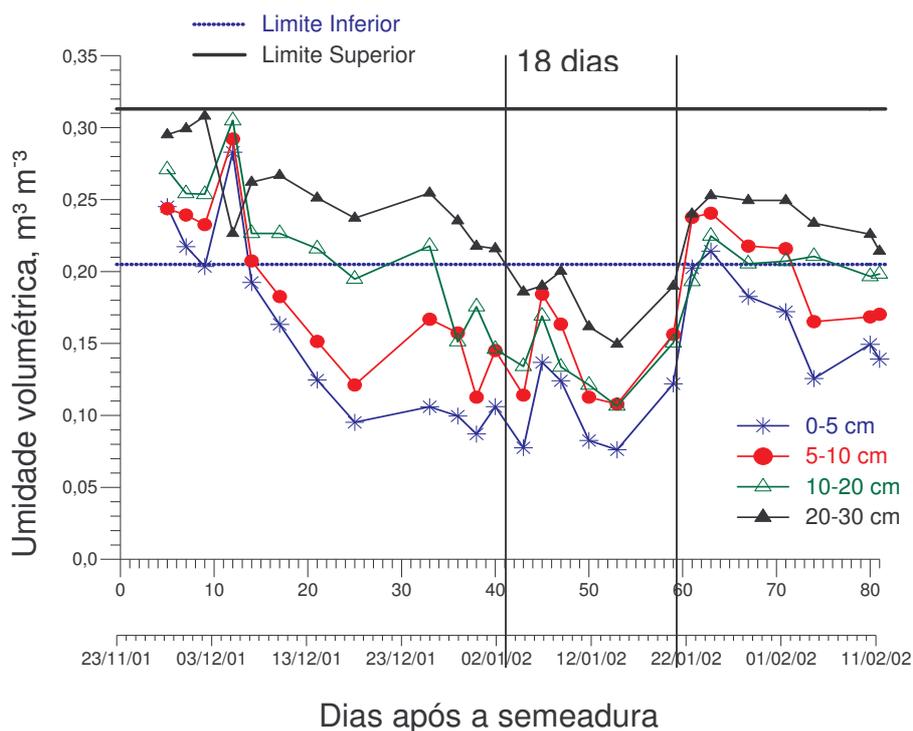


FIGURA 53. Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo do feijoeiro, em quatro profundidades no plantio direto.

Não houve diferenças entre a produtividade do feijoeiro nos diferentes sistemas de manejo do solo (Tabela 11), indicando que o período de dias em que o solo permaneceu fora das condições ideais não foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade do feijoeiro. Discordando de Salih et al. (1998), que verificaram maior produtividade de algodão no tratamento que recebeu subsolagem.

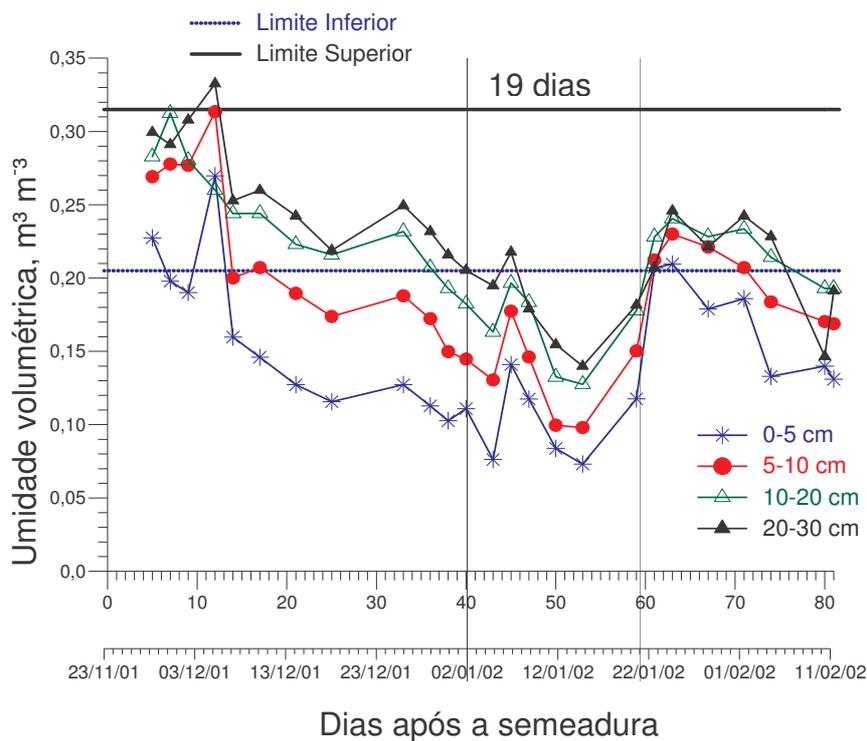


FIGURA 54. Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo do feijoeiro, em quatro profundidades no preparo convencional.

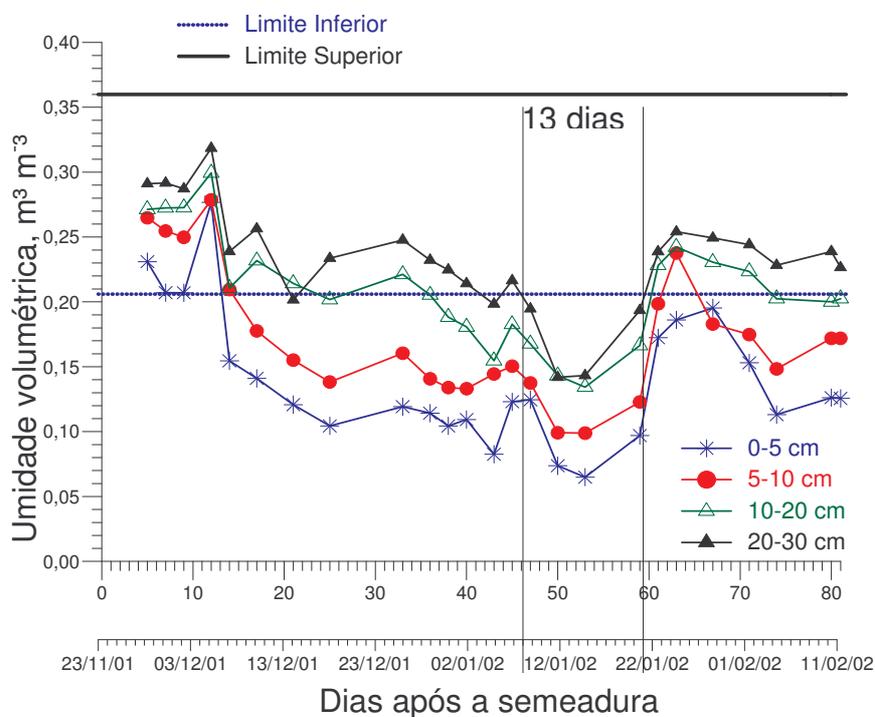


FIGURA 55. Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo do feijoeiro, em quatro profundidades no preparo reduzido.

TABELA 11. Produtividade do feijoeiro nos diferentes sistemas de preparo do solo.

Tratamento	Mg ha ⁻¹	Sc ha ⁻¹ *
Plantio direto	2,40a	39,98
Preparo convencional	2,29a	38,15
Preparo reduzido	2,25a	37,49

* Sc = sacas de 60 kg.

CONCLUSÕES

A proteção da palha no plantio direto reduziu a amplitude da temperatura na profundidade de 2,5 cm e de 10 cm, comparado com o preparo reduzido e com o preparo convencional.

O revolvimento do solo reduziu a densidade do solo e a resistência à penetração, efeito que foi verificado até a colheita do feijoeiro.

O plantio direto apresentou menor volume radicular do que o preparo reduzido e convencional, mas a produtividade do feijoeiro não foi diferente para os três sistemas de manejo do solo.

De acordo com metodologia do intervalo hídrico ótimo, o feijoeiro permaneceu 18 dias fora dos limites críticos de umidade do solo para o plantio direto, 19 dias para o preparo convencional e 13 dias para o preparo reduzido do solo.

Para as condições físicas existentes no experimento e para o Argissolo Vermelho-Amarelo, o período em que o feijoeiro permaneceu com umidade do solo abaixo do limite inferior do intervalo hídrico ótimo não se correlacionou com a produtividade.

CONCLUSÕES GERAIS

Em lavouras sob plantio direto, o acúmulo anual do tráfego das máquinas agrícolas provoca diferentes estados de compactação, o qual, é maior nas extremidades da gleba, região conhecida como “cabeceira” ou “virador”.

O valor da densidade do solo crítica, onde o intervalo hídrico ótimo é zero, foi variável para os tipos de solos, mas igual para os estados de compactação. Sugerindo um índice promissor na comparação entre manejos ou estados de compactação para o mesmo tipo de solo.

A conseqüência da compactação do solo na produtividade de plantas foi dependente da cultura, sendo que o trigo e o milho a produtividade diminuiu no maior estado de compactação em relação à área escarificada ou em relação ao menor estado de compactação. Para a soja, não se observou diminuição de produtividade entre estados de compactação e a área escarificada.

O manejo de solo reduziu a densidade do solo aumentou a amplitude entre o limite inferior e o limite superior de disponibilidade hídrica, determinada pelo intervalo hídrico ótimo e, o solo, permaneceu por maior período dentro dos limites de umidade do intervalo hídrico ótimo.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Em vista de dificuldades e dúvidas identificadas na execução dos experimentos, no decorrer da análise dos dados, discussão dos resultados e revisão de literatura, apresentamos algumas sugestões para maiores estudos.

Validar a hipótese de que o valor do intervalo hídrico ótimo pode ser utilizado em diferentes condições de manejo de solo e estados de compactação e que pode ser utilizado como um parâmetro universal na comparação da qualidade física de um mesmo tipo de solo.

Identificar limites críticos de resistência mecânica à penetração diretamente no campo, monitorando-se a umidade do solo para proporcionar um valor de resistência à penetração constante durante todo o desenvolvimento da planta.

Avaliar, em longo prazo, o efeito da escarificação ou subsolagem, se e quando necessário, na diminuição do estado de compactação.

Avaliar a recompactação pelo tráfego de máquinas em lavouras que receberam escarificação ou subsolagem, mediante a orientação do sistema de tráfego num mesmo local.

Monitorar a umidade do solo durante todo o desenvolvimento da planta e determinar o período em que o solo apresenta as condições físicas acima ou abaixo do limite superior e do limite inferior do intervalo hídrico ótimo e relacionar com a produtividade das plantas, principalmente, nos latossolos que utilizamos neste estudo que apresentam elevado estado de compactação.

LITERATURA CITADA

- ABREU, L.S. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um ARGISSOLO**. 2000. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 115-119, 1995.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J. & FIORIN, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p.151-157, 1996.
- ALBUQUERQUE, J.A. & REINERT, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.539-549, 2001.
- 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.
- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 319-326, 1996.
- ALVES, C.M. & CABEDA, M.S. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 753-761, 1999.
- AMAZODO, U.D.N.; RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E. & NORRIS, E.R. Physical-mechanical properties and yield of silage corn as affected by soil compaction and tillage methods. **Soil & Tillage Research**, v. 3, p. 331-345, 1983.
- AZOOZ, R.H.; LOWERY, B. DANIEL, T.C. Tillage and residue management influence on corn growth. *Soil Till. Res.*, 33:215-227, 1995.

- AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. & FRANZLUEBBERS, A.J. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in northwestern Canada. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 1197-1201, 1996.
- BALL, B.C. & O'SULLIVAN, M.F. Soil strength and crop emergence in direct drilled and ploughed cereal seedbeds in seven field experiments. **Journal of Soil Science**, v. 33, p. 609-622, 1982.
- BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C. & SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. **Soil & Tillage Research**, v. 45, p. 237-249, 1998.
- BALOTA, E.L., COLLOZZI-FILHO, A., ANDRADE, D.S. & HUNGRIA, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 641-649, 1998.
- BARBER, S.A. Effect of tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. **Agronomy Journal**, v. 63, p. 724-726, 1971.
- BARCELOS, A.A; CASSOL, A.E. & DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 35-43, 1999.
- BARUM, A.O. **Estimativa do impacto macroeconômico do plantio direto na região de solos arenosos do Rio Grande do Sul**. 1999. 119f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.
- BASSANI, H.J. Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não pastejada. 1996, 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 1996.
- BELTRAME, L.F.S., GONDIM, L.A.P. & TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 145-149, 1981.
- BENJAMIN, J.G. Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. **Soil Tillage Research**, v. 26, p. 277-288, 1993.
- BERG, M.v.d. & KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: I. Análise da variância por amostragem aninhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 393-399, 1997.

- BETZ, C.L.; ALMARAS, R.R. & COPELAND, S.M. Least limiting water range: traffic and term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1384-1393, 1998.
- BRITO, L.T. de L.; LOVEREIRO, B.T.; DENICULI, W.; RAMOS, M.M. & SOARES, J.M. Influência do método na determinação da velocidade de infiltração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 503-507, 1996.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Trans. ASAE**, v. 33, p. 519-524, 1990.
- BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R. & SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.
- BUSSCHER, W.J.; FREDERICK, J.R. & BAUER, P.J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 999-1003, 2000.
- BUSSCHER, W.J.; FREDERICK, J.R. & BAUER, P.J. Effect of penetration resistance and timing of rain on grain yield of narrow-row corn in a coastal plain loamy sand. **Soil & Tillage Research**, v. 63, p. 15-24, 2001.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; *et al.* Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p.1501-1511, 1994.
- CAMPOS, B.C. de; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDEL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p.121-126, 1995.
- CANALI, L.B. & ROLOFF, G. Influência do preparo e da correção do solo na condição hídrica de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 99-104, 1997.
- CANARACHE, A.; TRANDAFIRESCU, T.; COLIBAS, I. HOROBEANU, I.; PATRU, V.; SIMOTA, H. & TRANDAFIRESCU, T. Effect of induced compaction by wheel traffic on soil physical properties and yield of maize in Romania. **Soil & Tillage Research**, v. 4, p. 199-213, 1984.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, v. 25, p. 183-188, 1995.

- CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 99-105, 1990.
- CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity on a fine sandy loam under moldboard ploughing and direct drilling. **Soil & Tillage Research**, v. 12, p. 35-51, 1988.
- CARTER, M.R.; ANGERS, D.A. & TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science**, v. 164, p. 101-110, 1999.
- 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.
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 197-201, 1983.
- 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., Passo Fundo, 1978. **Anais...** Passo Fundo, EMBRAPA, CNPTrigo, 1978. p.145-152.
- COMISSÃO ESTADUAL DE PESQUISA DO FEIJÃO-CEPEF. **Feijão, recomendações técnicas para cultivo no Rio Grande do Sul**. 2000, eds. BALARDIN, R.S.; COSTA, E.C.C.; RIBEIRO, N.D.; *et al.* Santa Maria, RS. 80p.
- CONAB, 2002 http://www.conab.gov.br/politica_agricola/Safra/Quadro15.xls. Acesso em 03/12/2002.
- CORRECHEL, V.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 165-173, 1999.
- COUTO, E.G.; KLAMT, E. & STEIN, A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.129-140, 2000.
- Da ROS, C.O.; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A. & PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e

estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 241-247, 1997.

DARIVA, T.A. **Variabilidade espacial de solo e da cultura da soja em várzea sistematizada**. 2001, 120f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

DATIRI, B.C. & LOWERY, B. Effects of conservation tillage on hydraulic properties of a Griswold silt loam soil. **Soil & Tillage Research**, v. 21, p. 257-271, 1991.

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

DIEBOLD, C.H. Rapid methods for estimating readily available moisture and bulk density of medium-textured to fine-textured soils. **Agronomy Journal**, v. 45, p. 36-37, 1953

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. **Defining and assessing soil quality**. In Doran, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; *et al.* eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994.

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil Tillage Research**, v. 3: 261-275, 1983.

ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D.; BAUMGARTNER, K.; TAM, K.A. & BRADSHAW, K.L. In situ measurements of hydraulic properties of soils using the Guelph permeameter and the Guelph infiltrometer. **Proceedings of the Third International Workshop on Land Drainage**. Ohio State University, pp G13-G23, 1987.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises dos solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

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

FLOWERS, M.D. & LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p. 21-35, 1998.

- FORSYTHE, W.M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latino Americana**, v. 4, p. 165-176, 1967.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geostatistics for the environmental sciences** (version 5.1 for windows). Michigan: 2000.
- GAULTNEY, L., KRUTZ, G.W., STEINHARDT, G.C. & LILJEDAHL, J.B. The effects of subsoil compaction on corn yields. **Transactions American Society of Agricultural Engineering**, v. 25, p. 563-569, 1982.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. **Particle-size analysis**. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy. 1986. p. 383-411.
- GENRO JR., S.A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas**. 2002, 89f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2002.
- GERARD, C.J., SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 875-879, 1982.
- GLINSKI, J. & LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton, CRC Press, 1990. 250 p.
- GONÇALVES, A.C.A., FOLEGATTI, M.V. & SILVA, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 155-164, 1999.
- GRABLE, A.R. Soil aeration and plant growth. **Advances in Agronomy**, v. 18, p. 57-106, 1966.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society American Journal**, v.32, 18-186, 1968.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v. 6, p. 65-100, 1987.
- HAKANSSON, I. & MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil & Tillage Research**, v. 35, p. 85-97, 1995.
- HAKANSSON, I. The degree of compactness as a link between technical, physical and biological aspects of soil compaction. In: **Proceedings of International Conference on Soil Compaction and Soil Management**, 8 - 12 June, 1992, Tallinn, Estonia, p. 75 – 78.

- 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.
- HERNANI, L.C. & SALTON, J.C. O CPAO e o sistema plantio direto. **Revista Plantio direto**, Passo Fundo, v. 45, p. 27-33, 1998.
- HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, p. 161-166, 1990.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts, USA. Academic Press, 1980. 413 p.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998, 771p.
- HILLEL, D., KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. **Soil Science**, v. 114, p. 395-400, 1972.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da & TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1493-1500, 2000.
- JOHNSON, M.D.; LOWERY, B. & DANIEL, T.C. Soil moisture regimes of three conservation tillage systems. **Transactions of the ASAE**, v. 27, p. 1385-1390 & 1395, 1984.
- JONG van LIER, Q de. & LIBARDI, P.L. Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 535-542, 1997.
- KARUNATILAKE, U.; van ES, H.M. & SCHINDELBECK, R.R. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfafa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York. **Soil & Tillage Research**, v. 55, p. 31-42, 2000.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W. S. **Size distribution of aggregates**. In: BLACK C. A. Methods of Soil Analysis. Part 1. Madison, Wisconsin USA. 1965. p. 495-509
- KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153f. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

- KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 130f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.
- LIBARDI, P.L., MANFRON, P.A., MORAES, S.O. & TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 1-12, 1996.
- LIPIEC, L. & SIMOTA, C., 1994. **Role of soil and climate factors in influencing crop responses to soil compaction in Central and Eastern Europe**. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, pp. 365–390.
- LOGSDON, S.D.; RENEAU, R.B. & PARKER, J.C. Corn seedling root growth as influenced by soil physical properties. **Agronomy Journal**, v.79, p. 221-224, 1987.
- LOWERY B. & SCHULER, R.T. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant-growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 216-223, 1991.
- MACHADO, J.A., PAULA SOUZA, D.M. de & BRUM, A.C.R. de. Efeito de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 187-189, 1981.
- MARTINO, D. & SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 74, p. 193-200, 1994.
- MATERECHERA, S.A.; ALSON, A.M.; KIRB, J.M. & DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into compacted subsoil. **Plant and Soil**, v. 144, p. 297-303, 1992.
- MELLO IVO`, W.M.P. & MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 135-143, 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.

- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 369-374, 1991.
- MESSING, I. & JARVIS, N.J. A comparison of near-saturated hydraulic properties measured in small cores and large monoliths in a clay soil. **Soil Technology**, v. 7, p. 291-302, 1995.
- MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura. Diretoria de Terras e Colonização. Seção de Geografia, 1961.46p.
- NESMITH, D.S.; RADCLIFFE, D.E.; HAFGROVE, W.L.; CLARK, R.L. & TOLLNER, E.W. Soil compaction in double wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society American Journal**, v. 51, p. 183-186, 1987.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. & ERH, K.T. Spatial variability of field measured soil-water properties. **Hilgardia**, v. 42, p. 215-259, 1973.
- OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E. & LUNA, J.G. de. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 783-789, 1999.
- ORELLANA, J.A. de; PILATTI, M.A. & GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical state assessment. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 9, p. 91-108, 1997.
- OUSSIBLE, M. & CROOKSTON, R.K. Effect of subsoiling a compacted clay loam soil on growth, yield, and yield components of wheat. **Agronomy Journal**, v. 79, p.882-886, 1987.
- PASSIOURA, J.B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal Soil Research**, v. 29, p. 717-728, 1991.
- PIKUL J.L; RAMIG, R.E & WILKINS, D.E. Soil properties and crop yield among 4 tillage systems in a wheat pea rotation. **Soil & Tillage Research**, v. 26, p. 151-162, 1993.
- PLATAFORMA PLANTIO DIRETO. FREITAS, P.L. (coord.) Disponível em : <http://www.Embrapa.br/plantiodireto/> acesso em 19 mar. 2002.
- QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S. & MIRANDA, M.A.C. de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 929-938, 2000.

- RADFORD, B.J.; BRIDGE, B.J.; DAVIS, R.J.; MacGARRY, D.; PILLAI, U.P.; RICKMAN, I.F.; WALSH, P.A. & YULE, D.F. Changes in properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil & Tillage Research**, v.54. p. 155-170; 2000.
- RADFORD, B.J.; YULE, D.F.; McGARRY, D. & PLAYFORD, C. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. **Soil & Tillage Research**, v.61. p. 157-166; 2001.
- RATCLIFF, L.F., RITCHIE, J.T. & CASSEL, D.K. Field- measured limits of soil water availability as related to laboratory measured properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 770-775, 1983.
- REICHART, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 211-216, 1988.
- REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Modificações físicas em solos manejados sob sistema de plantio direto. **V Reunião de la Red Latinoamericana de Agricultura Conservacionista- RELACO**, Florianópolis, 1999.
- REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a Typic Hapludalf**. 1990. 128f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Michigan State University, Michigan, 1990.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SILVA, V.R. **Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado**. In: CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M. & CERETTA, C.A. eds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, RS, 2001, 165 p.
- RICHTIE, J.T. Soil water availability. **Plant and Soil**, v. 58, p. 327-338, 1981.
- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 821-828, 1999.
- RUSSEL, R.S. & GROSS, M.G. Physical aspects of soil fertility-The response of roots to mechanical impedance. **Journal Agricultural Science**, v. 22, p.305-318, 1974.
- SALIH, A.A.; BABIKIR, H.M. & ALI, S.A.M. Preliminary observations on effects of tillage systems on soil physical properties, cotton root growth and yield in Geriza Scheme, Sudan. **Soil & Tillage Research**, v. 46, p. 187-191, 1998.

- SALTON, J.C. & MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, P. 313-319, 1995.
- SAUER, T.J.; CLOTHEER, B.C. & DANIEL, T.C. Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil. **Soil & Tillage Research**, v. 15, p. 359-369, 1990.
- SCHULER, R.T. & LOWERY, B. Long term compaction effects on soil and plant growth. **American Society Agricultural Engineering**, 1986.
- SEGANFREDO, M.L.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. de. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 287-291, 1997.
- SENE, M; VEPRASKAS, M.J; NADERMAN, G.C & DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 422-427, 1985.
- SHARMA, M.L. & UEHARA, G. Influence of soil structure on water relations in low Humic Latosols: II Water movement. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 32, p. 770-774, 1968.
- SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R. & ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo Distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.265-268, 1984.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, v. 184, 323-329, 1996.
- SILVA, A.P. da & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 877-883, 1997.
- SILVA, A.P. da; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, M.L.N.; CURI, N. & BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2485-2492, 2000. a

- SILVA, V.R., REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 795-801, 2000. b
- SILVA, V.R.; REINERT, D. & 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. c
- SILVA, V.R.; REINERT, D.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade do solo de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I- Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.
- SLAY, J.M.; LOCKABY, B.G.; ADAMS, J.C. & VIDRINE, C.G. The influence of pretreatment forest soil variability on interpretation of post treatment results. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 1594-1597, 1986.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 7 ed. Ames, Iowa State University, 1974. 507p.
- SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. **Soil compaction problems in world agriculture**. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 1994. p. 01-21.
- SOUZA, L.S., COGO, N.P., VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 367-372, 1997.
- SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 77-86, 1998.
- SOUZA, L.S. & REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 183-189, 1996.
- SOUZA, Z.M. SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S; CARVALHO, M.P. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, em Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 699-707, 2001.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM Institute. **SAS User's guide; statistics**. 5 ed. Cary, N.C., 1985. 956p

- STONE, L.R. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 395-401, 2001.
- STONE, L.R.; TEARE, I.D.; MICKELL, C.D. & MAYAKI, W.C. Soybean root development and soil water depletion. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 677-680, 1976.
- TAVARES FILHO, J., BARBOSA, G.M.C., GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 725-730, 2001.
- 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. & BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, v.19, p. 111-119, 1991.
- TAYLOR, H.M. & RATLIFF, L.F. Root growth pressures of cotton, peas, and peanuts. **Agronomy Journal**, v. 61, p. 398-402, 1969.
- TAYLOR, H.M., ROBERSON, G.M. & PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 18-22, 1966.
- TENNANT, D. A test modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, p. 995-1001, 1975.
- THOMPSON, P.J., JANSEN, I.J. & HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1288-1293, 1987.
- 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.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. da & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, v. 52, p. 223-232, 1999.

- UNGER, P.W. & JONES, O.R. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. **Soil & Tillage Research**, v. 45, p. 39-57, 1998.
- UNGER, P.W. & KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v. 86, p.759-766, 1994.
- UTSET, A., CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferrosol at several soil moisture conditions. **Soil & Tillage Research**, v. 61, p. 193-202, 2001.
- VAN, GENUCHTEN, M.Th. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VAZ, C.M.P.; BASSOI, L.H. & HOPMANS, J.W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil & Tillage Research**, v. 60, p. 35-42, 2001.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v. 68, p. 75-94, 1949.
- VEPRASKAS, M.J. & WAGGER, M.G. Cone index values diagnostic of where subsoiling can increase corn root growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, p. 1499-1505, 1989.
- VIEIRA, M.L. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, p. 873-882, 1984.
- VOORHEES, W.B.; JOHNSON, J.F.; RANDALL, G.W. & NELSON, W.W. Corn growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 294-303, 1989.
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G. & NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42p. 344-349, 1978.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D. (ed.). Applications of soil physics. New York: Academic, 1980.

- WHITE, I. Tillage practices and soil hydraulic properties: Why quantify the obvious? In: Loveday, J. (ed). **National Soils Conference**, 1992. Review Papers. Australian Society Soil Science, Ned land, W. A.
- WHITELEY, G.M.; UTOMO, W.H. & DEXTER, A.R. A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. **Plant and Soil** 61:351-364, 1982.
- WU, L.; SWAN, J.B.; PAULSON, W.H. & RANDALL, G.W. Tillage effects on measured soil hydraulic-properties. **Soil & Tillage Research**, v. 25, p. 17-33, 1992.
- ZOBEL, R.W. **Soil environmental constraints to root growth**. In : HATFIELD, J.J. & STEWART, B.A. eds. Limitations to plant root growth. New York, Springer-Verlag, 1992, p. 27-48.

ANEXOS

ANEXO A. Valores de umidade gravimétrica do solo na determinação dos estados de compactação, no Argissolo Vermelho-Amarelo.

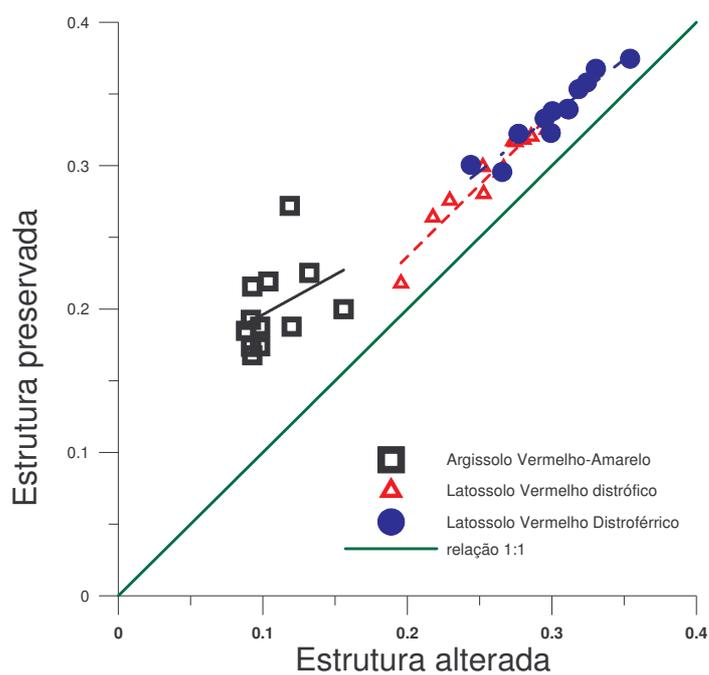
Distância para o centro da gleba (m)	Profundidade (cm)	Umidade do solo (kg kg ⁻¹)
1	0-5	0,17
1	5-10	0,16
1	10-15	0,15
1	15-20	0,17
9	0-5	0,18
9	5-10	0,18
9	10-20	0,17
24	0-5	0,20
24	5-10	0,15
24	10-20	0,20
40	0-5	0,16
40	5-10	0,14
40	10-20	0,19

ANEXO B. Valores de umidade gravimétrica do solo na determinação dos estados de compactação, no Latossolo Vermelho distrófico.

Distância para o centro da gleba (m)	Profundidade (cm)	Umidade do solo (kg kg ⁻¹)
1	0-5	0,24
1	5-10	0,28
1	10-15	0,24
1	15-20	0,30
1	20-30	0,32
1	30-40	0,34
5	0-5	0,25
5	5-10	0,25
5	10-15	0,27
5	15-20	0,30
5	20-30	0,32
5	30-40	0,38
10	0-5	0,22
10	5-10	0,28
10	10-15	0,29
10	15-20	0,31
10	20-30	0,33
10	30-40	0,34
15	0-5	0,26
15	5-10	0,28
15	10-15	0,29
15	15-20	0,30
15	20-30	0,31
15	30-40	0,35
20	0-5	0,27
20	5-10	0,28
20	10-15	0,25
20	15-20	0,28
20	20-30	0,31
20	30-40	0,35
25	0-5	0,28
25	5-10	0,26
25	10-15	0,25
25	15-20	0,29
25	20-30	0,31
25	30-40	0,36
30	0-5	0,29
30	5-10	0,28
30	10-15	0,29
30	15-20	0,32
30	20-30	0,34
30	30-40	0,35

ANEXO C. Valores de umidade gravimétrica do solo na determinação dos estados de compactação, no Latossolo Vermelho distroférico típico.

Distância para o centro da gleba (m)	Profundidade (cm)	Umidade do solo (kg kg ⁻¹)
1	0-5	0,33
1	5-10	0,33
1	10-15	0,34
1	15-20	0,35
1	20-30	0,36
1	30-40	0,38
5	0-5	0,43
5	5-10	0,32
5	10-15	0,37
5	15-20	0,38
5	20-30	0,39
5	30-40	0,43
10	0-5	0,31
10	5-10	0,32
10	10-15	0,37
10	15-20	0,38
10	20-30	0,38
10	30-40	0,42
15	0-5	0,27
15	5-10	0,31
15	10-15	0,30
15	15-20	0,35
15	20-30	0,39
15	30-40	0,43
20	0-5	0,29
20	5-10	0,31
20	10-15	0,33
20	15-20	0,35
20	20-30	0,40
20	30-40	0,43
25	0-5	0,30
25	5-10	0,32
25	10-15	0,34
25	15-20	0,34
25	20-30	0,39
25	30-40	0,40
30	0-5	0,28
30	5-10	0,28
30	10-15	0,33
30	15-20	0,33
30	20-30	0,40
30	30-40	0,42



ANEXO D. Relação entre a quantidade de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) retida no potencial de $-1,5 \text{ MPa}$ em amostras com estrutura preservada e amostras com estrutura alterada.

ANEXO E. Parâmetros empíricos da equação $K_{\theta} = a e^{b \cdot \theta}$.

Tratamento	Profundidade	a	b	r ²
Maior estado de compactação	10-20 cm	$5 \cdot 10^{-11}$	50,817	0,949
	20-35 cm	$5 \cdot 10^{-11}$	52,201	0,987
	35-50 cm	$3 \cdot 10^{-8}$	36,138	0,993
	50-75 cm	$5 \cdot 10^{-11}$	50,994	0,987
	75-100 cm	$7 \cdot 10^{-21}$	98,23	0,959
Intermediário estado de compactação	10-20 cm	$9 \cdot 10^{-18}$	96,839	0,944
	20-35 cm	$2 \cdot 10^{-14}$	71,206	0,958
	35-50 cm	$1 \cdot 10^{-7}$	34,224	0,871
	50-75 cm	$7 \cdot 10^{-10}$	46,619	0,990
	75-100 cm	$5 \cdot 10^{-21}$	112,31	0,993
Menor estado de compactação	10-20 cm	$1 \cdot 10^{-10}$	49,957	0,955
	20-35 cm	$2 \cdot 10^{-8}$	39,027	0,975
	35-50 cm	$1 \cdot 10^{-9}$	47,97	0,992
	50-75 cm	$7 \cdot 10^{-14}$	68,242	0,964
	75-100 cm	$5 \cdot 10^{-21}$	95,096	0,993
Escarificado	10-20 cm	$2 \cdot 10^{-7}$	42,625	0,921
	20-35 cm	$4 \cdot 10^{-10}$	62,182	0,948
	35-50 cm	$1 \cdot 10^{-7}$	42,431	0,920
	50-75 cm	$1 \cdot 10^{-12}$	75,716	0,985
	75-100 cm	$9 \cdot 10^{-17}$	85,694	0,988