

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA
VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO E
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS, EM FUNÇÃO DE
MANEJO DE SOLO E DE ROTAÇÃO DE CULTURAS**

SILVIO TULLIO SPERA

**Orientador: Prof. Ph.D. Pedro Alexandre Varella Escosteguy
Co-orientador: Dr. José Eloir Denardin**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, outubro de 2009

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese

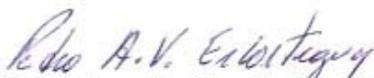
“Atributos físicos e químicos de um latossolo vermelho e produtividade de culturas, em função de manejo de solo e de rotação de culturas”

Elaborada por

SILVIO TULIO SPERA

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
“Doutor em Agronomia – Área de Produção Vegetal”

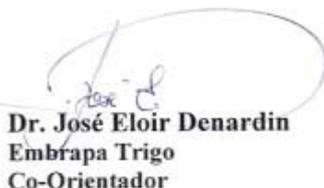
Aprovada em: 30/10/2009
Pela Comissão Examinadora



Dr. Pedro Alexandre Varella Escosteguy
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador



Dr. Vilson Antonio Klein
Coordenador PPGAgro



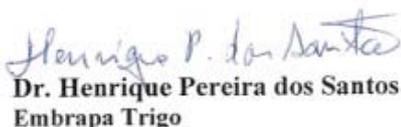
Dr. José Eloir Denardin
Embrapa Trigo
Co-Orientador



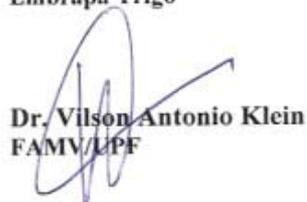
Dr. Mauro Antônio Rizzardi
Diretor FAMV



Dr. Sírio Wiethölter
Embrapa Trigo



Dr. Henrique Pereira dos Santos
Embrapa Trigo



Dr. Vilson Antonio Klein
FAMV/UPF

S749a Spera, Silvio Tulio
Atributos físicos e químicos de um latossolo e produtividade de
culturas, em função de manejo de solo e de rotação de culturas/
Silvio Tulio Spera. – 2009.
228 f. : il. ; 25 cm.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo
Fundo, 2009.

Orientação: Prof. Ph.D. Pedro Alexandre Varella Escosteguy.
Co-Orientação: Dr. José Eloir Denardin.

1. Produtividade agrícola. 2. Plantio direto. 3. Solos – Manejo.
4. Solos - Compactação. I. Escosteguy, Pedro Alexandre Varella,
orientador. II. Denardin, José Eloir, co-orientador. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecária responsável Priscila Jensen Teixeira - CRB 10/1867

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Maria Roseli e meus filhos Marco Tulio e Sabrina, pela ajuda, carinho, incentivo e paciência durante o curso;

Aos professores Pedro Alexandre Varella Escosteguy, pela amizade, orientação e paciência, Vilson Antonio Klein, pelo apoio e conselhos e aos colegas pesquisadores José Eloir Denardin, pela amizade e co-orientação, Henrique Pereira dos Santos, pela amizade, incentivo e conselhos. Aos demais colegas da Embrapa e professores da UPF, especialmente, Edson C. Bortoluzzi, Renato S. Fontaneli, Elmar L. Floss, Gilberto R. da Cunha e Walter Boller, pela amizade, ensinamentos e conselhos;

A todos os colegas de curso, especialmente Jeonice, Enrique, Chirlene, Marcolin e Alfredo, pela grande amizade;

Aos demais professores e funcionários do PPGAgro/UPF e dos Laboratórios de Física e Água e de Química do Solo;

Aos colegas do Laboratório de Solos da Embrapa Trigo, pela colaboração, e ao colega Márcio Nicolau pelas sugestões de análises estatísticas;

À Embrapa, pelo patrocínio ao curso de Pós-graduação;

Ao Dr. Maurice Formigheri, cardiologista, que tem me ajudado a manter o coração em ordem;

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho,

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| LISTA DE TABELAS..... | v |
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| LISTA DE APÊNDICES..... | x |
| Título..... | 1 |
| Autores..... | 1 |
| Resumo..... | 1 |
| Palavras-chave..... | 3 |
| Title..... | 3 |
| Abstract..... | 3 |
| Key words..... | 5 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 6 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 10 |
| 2.1 Alterações da estrutura de solos cultivados..... | 10 |
| 2.2 Atributos físicos do solo sujeitos a alterações..... | 12 |
| 2.3 Efeitos da degradação dos atributos físicos do solo..... | 15 |
| 2.3.1 Caracterização da compactação de solos..... | 18 |
| 2.3.2 A consolidação da compactação do solo..... | 19 |
| 2.4. Atributos químicos do solo sujeitos a alterações..... | 21 |
| 2.4.1 Componentes da acidez..... | 21 |
| 2.4.2 O alumínio do solo..... | 26 |
| 2.4.3 A toxidez de manganês..... | 27 |
| 2.4.4 Deficiência e excesso de fósforo e de potássio..... | 29 |
| 2.5 A solução do solo..... | 31 |
| 2.5.1 Especiação iônica e atividade química dos íons em solução..... | 34 |
| 2.5.2 Dinâmica do alumínio ligado a fase sólida do solo... | 35 |
| 2.6 Especiação química..... | 36 |
| 2.6.1 Moléculas orgânicas na solução do solo..... | 39 |
| 2.6.2 Especiação química de elementos..... | 39 |
| 2.6.3 Especiação química do alumínio..... | 41 |
| 2.6.3.1 Estimativa de espécies químicas..... | 44 |
| 2.6.3.2 Programa Visual MinteqA2..... | 46 |
| 2.7 A matéria orgânica particulada..... | 46 |
| 2.8 O manejo e rotações de culturas..... | 48 |
| 2.8.1 Modelos de rotação de culturas..... | 51 |

SUMÁRIO

| | Página |
|--|--------|
| 2.9 Condições climáticas e a produção vegetal..... | 52 |
| 2.10 As condições edáficas e a produção das culturas..... | 53 |
| 2.11 As práticas de manejo e as condições físicas do solo..... | 57 |
| 2.12 O manejo do solo e a produção das culturas..... | 59 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 62 |
| 3.1 Local do experimento..... | 62 |
| 3.2 Histórico da área experimental..... | 63 |
| 3.3 Caracterização climática..... | 64 |
| 3.4 Caracterização morfológica dos perfis culturais..... | 65 |
| 3.5 Coleta de amostras..... | 66 |
| 3.6 Avaliação dos atributos físicos..... | 67 |
| 3.7 Avaliação dos atributos químicos..... | 70 |
| 3.8 Análise da solução do solo..... | 72 |
| 3.9 Especificação iônica..... | 73 |
| 3.10 Avaliação da produção vegetal..... | 74 |
| 3.11 Delineamento e análise estatística..... | 75 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 77 |
| 4.1 Atributos físico-hídricos..... | 77 |
| 4.1.1 Densidade do solo..... | 77 |
| 4.1.2 Porosidade do solo..... | 78 |
| 4.1.3 Resistência à penetração do solo..... | 81 |
| 4.1.4 Densidade relativa..... | 83 |
| 4.1.5 Agentes de cimentação e agregantes..... | 85 |
| 4.1.5.1 Óxidos amorfos de ferro e alumínio..... | 85 |
| 4.1.5.2 Argila dispersa em água..... | 89 |
| 4.1.6 Curvas de retenção da água no solo..... | 90 |
| 4.1.7 Água disponível no solo..... | 95 |
| 4.1.8 Intervalo hídrico ótimo..... | 97 |
| 4.1.9 Condutividade hidráulica do solo saturado..... | 102 |
| 4.1.10 Correlações entre atributos físicos do solo..... | 103 |
| 4.2 Atributos químicos..... | 105 |
| 4.2.1 Acidez do solo..... | 105 |
| 4.2.2 Capacidade de troca catiônica..... | 116 |
| 4.2.3 Matéria orgânica, fósforo e potássio..... | 117 |
| 4.2.4 Enxofre e micronutrientes..... | 125 |
| 4.2.5 Correlações entre atributos químicos do solo..... | 129 |

SUMÁRIO

| | Página |
|--|--------|
| 4.2.6 Caracterização da solução do solo..... | 130 |
| 4.2.6.1 Cátions da solução do solo..... | 131 |
| 4.2.6.2 Ânions da solução do solo..... | 140 |
| 4.2.7 Especificação da solução do solo..... | 148 |
| 4.2.8 Atividade e complexação do alumínio..... | 148 |
| 4.2.9 Correlações entre atributos químicos do solo..... | 156 |
| 4.2.10 Correlações entre atributos físicos e químicos do solo..... | 157 |
| 4.3 Produção das culturas..... | 159 |
| 4.3.1 Rendimentos de culturas de trigo e aveia branca..... | 159 |
| 4.3.2 Rendimentos de culturas de soja e sorgo..... | 162 |
| 4.3.3 Produção de massa de matéria seca..... | 165 |
| 4.3.3.1 Produção de massa de matéria seca de culturas de inverno..... | 165 |
| 4.3.3.2 Produção de massa de matéria seca de soja e sorgo..... | 166 |
| 4.3.4 Rendimento de palha das rotações de culturas..... | 172 |
| 4.3.5 Correlações entre atributos do solo e o rendimento de culturas..... | 175 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 177 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 180 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 182 |
| APÊNDICES..... | 221 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | | Página |
|--------|---|--------|
| 1 | Densidade de solo de tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 78 |
| 2 | Porosidade total, macroporosidade, microporosidade e criptoporosidade de tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 79 |
| 3 | Resistência à penetração na tensão de 10 kPa de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 81 |
| 4 | Resistência à penetração nas tensões de 300 kPa e 500 kPa de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 82 |
| 5 | Densidade relativa de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 85 |
| 6 | Fe extraído pelo oxalato de amônio de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 87 |
| 7 | Al extraído pelo oxalato de amônio de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 88 |
| 8 | Argila dispersa em água de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 89 |
| 9 | Condutividade hidráulica do solo saturado de três tipos de manejo e de duas rotações de culturas..... | 102 |
| 10 | Correlações entre atributos físicos de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 104 |
| 11 | pH e índice SMP de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 106 |
| 12 | Al, saturação por bases e saturação por Al de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 109 |
| 13 | Ca de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 111 |
| 14 | Mg de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 112 |
| 15 | Relação Ca:Mg de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 114 |
| 16 | Mn de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 115 |
| 17 | Capacidade de troca catiônica (CTC) de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 117 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | | Página |
|--------|--|--------|
| 18 | Matéria orgânica do solo, avaliada pelo método de rotina, de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 118 |
| 19 | Matéria orgânica do solo (MOS) e das respectivas frações particulada (MOP) e associada aos minerais (MOM) de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 119 |
| 20 | Fósforo (P) de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 121 |
| 21 | Potássio (K) de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 122 |
| 22 | Relação Ca+Mg:K de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 125 |
| 23 | Enxofre (S) e boro (B) de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 126 |
| 24 | Zinco (Zn) de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 128 |
| 25 | Correlações entre atributos químicos de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 129 |
| 26 | pH da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 131 |
| 27 | Al^{3+} da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 132 |
| 28 | Ca^{2+} da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 133 |
| 29 | Mg^{2+} da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 134 |
| 30 | K^{+} da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 135 |
| 31 | $N-NH_4^{+}$ da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 138 |
| 32 | Mn^{2+} da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 139 |
| 33 | $N-NO_2^{-}$ da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 141 |
| 34 | $N-NO_3^{-}$ da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 141 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | | Página |
|--------|---|--------|
| 35 | S-SO ₄ ²⁻ da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 143 |
| 36 | P-PO ₄ ³⁻ da solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 144 |
| 37 | Carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 146 |
| 38 | Percentuais de formas de Al tóxico na solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 152 |
| 39 | Percentuais Al-DOM na solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 153 |
| 40 | Atividade de formas de Al tóxico na solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 155 |
| 41 | Atividade do Al-DOM na solução do solo de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 156 |
| 42 | Correlações entre atributos químicos da solução de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 157 |
| 43 | Correlações entre os atributos físicos e os químicos de tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 158 |
| 44 | Correlações entre rendimentos de grãos e de matéria seca de culturas com os atributos físicos e químicos de três tipos de manejo e de rotações de culturas..... | 176 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Densidade relativa da camada de 6,8 a 20 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 84 |
| 2 | Fe extraído pelo oxalato de amônio da camada de 6,8 a 20 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 86 |
| 3 | Curvas características de retenção de água de solo manejado com PD (a) e com PC (b)..... | 93 |
| 4 | Curvas características de retenção de água de solo manejado com PM (a); e de mata (b)..... | 94 |
| 5 | Perfis de distribuição de água disponível no solo, na profundidade de 0 a 25 cm, em função dos tipos de manejos de solo..... | 96 |
| 6 | Representação gráfica do IHO de um LVd, em função dos tipos de manejos de solo..... | 98 |
| 7 | Perfis de distribuição da água disponível, calculado pelo método do IHO, de um LVd, em função dos tipos de manejos de solo..... | 101 |
| 8 | Relação Ca:Mg da camada de 6,8 a 20 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 113 |
| 9 | Relação Ca+Mg:K da camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 123 |
| 10 | Relação Ca+Mg:K da camada de 6,8 a 20 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 124 |
| 11 | pH da solução do solo, na camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 130 |
| 12 | K^+ da solução do solo da camada de 6,8 a 20 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 135 |
| 13 | $N-NH_4^+$ da solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 137 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 14 | Carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo da camada de 6,8 a 20 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 145 |
| 15 | Percentuais de Al^{3+} na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 148 |
| 16 | Percentuais de $Al(OH)_2^+$ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 149 |
| 17 | Atividade de Al^{3+} na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 150 |
| 18 | Atividade de $Al(OH)_2^+$ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas..... | 151 |
| 19 | Rendimentos de grãos de trigo, em função de rotações de culturas..... | 160 |
| 20 | Rendimento de grãos de sorgo, em função dos tipos de manejo do solo..... | 164 |
| 21 | Quantidade de massa de matéria seca da parte aérea de trigo, em função de rotações de culturas. | 166 |
| 22 | Quantidade de massa de matéria seca da parte aérea de soja, em função dos manejos de solo..... | 169 |
| 23 | Quantidade de massa de matéria seca da parte aérea de sorgo, em função dos manejos de solo..... | 170 |
| 24 | Produção total de massa de matéria seca da parte aérea ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), em função dos manejos de solo..... | 173 |
| 25 | Produção total de massa de matéria seca da parte aérea ($kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), de três seqüências de rotação de culturas..... | 174 |

LISTA DE APÊNDICES

| Apêndice | | Página |
|----------|---|--------|
| A | Valores de probabilidade de erro (p) dos atributos físicos do solo, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores..... | 221 |
| B | Valores de probabilidade de erro (p) dos atributos químicos do solo, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores..... | 222 |
| C | Valores de cátions, anions e outros atributos (mmol L^{-1}) determinados na solução de solo, em função dos tipos de manejos..... | 223 |
| D | Valores de probabilidade de erro (p), das frações de matéria orgânica do solo, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores..... | 224 |
| E | Valores de probabilidade de erro (p) dos atributos químicos da solução do solo, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores..... | 225 |
| F | Doses, fórmulas e modo de aplicação de fertilizantes, nos últimos cinco anos, nas culturas de verão e inverno dos tratamentos referentes ao experimento..... | 226 |
| G | Valores de probabilidade de erro (p) do percentual e da atividade de formas do Al da solução do solo, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores..... | 227 |
| H | Valores de probabilidade de erro (p) dos rendimentos de grãos, de matéria seca e de palha de culturas da safra 2007, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores..... | 228 |

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO E
PRODUTIVIDADE DE CULTURAS, EM FUNÇÃO DE
MANEJO DE SOLO E DE ROTAÇÃO DE CULTURAS**

**SILVIO TULIO SPERA¹, PEDRO ALEXANDRE VARELLA
ESCOSTEGUY², JOSÉ ELOIR DENARDIN³**

RESUMO – O rendimento de grãos (RG) é influenciado pelo tipo de manejo de solo e de rotação de culturas, sendo que o efeito prolongado da interação destes fatores no RG e nos atributos do solo das camadas exploradas pelas raízes é pouco conhecido. O objetivo do trabalho foi o de avaliar a interação destes dois fatores na produção vegetal de culturas de grãos (safra 2007), e nos atributos físicos e químicos de duas camadas de solo situadas entre 0 a 20 cm. O experimento foi conduzido na Embrapa Trigo (Passo Fundo, RS), em um Latossolo Vermelho distrófico, após mais de duas décadas de cultivo, sem aplicação de calcário. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas. Os tratamentos testados foram: plantio direto (PD), cultivo mínimo com escarificador (PM) e preparo convencional com arado e grade (PC). Estes foram combinados com as rotações de culturas: trigo/soja (R1); trigo/soja - ervilhaca/sorgo (R2) e trigo/soja - ervilhaca/sorgo - aveia

¹ Eng.-Agr., doutorando do Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal - spera@cnpt.embrapa.br

² Orientador, Eng.-Agr., PhD, professor da FAMV/PPGAgro/UPF – escosteguy@upf.br

³ Co-orientador, Eng.-Agr., Dr., pesquisador da Embrapa Trigo – denardin@cnpt.embrapa.br

branca/soja (R3), para avaliar o efeito da interação destas rotações com o tipo de manejo de solo (PD, PC e PM) no RG, na massa seca da parte aérea (MS) e nos atributos físicos e químicos de solos e da solução do solo (atributos químicos), nas camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm. A interação entre manejo de solo e rotação de culturas influenciou o RG e a MS do trigo e do sorgo, além da MS da soja. O RG não variou com o tipo de manejo de solo, exceto o do sorgo; nem com o tipo de rotação de culturas, exceto o RG de trigo. Os valores de RG e MS de aveia branca e de ervilhaca não variaram com os fatores estudados, nem com as interações entre os fatores. As rotações R2 e R3 aumentaram a produção de MS de trigo. Os RG de sorgo e a MS de sorgo e a de soja foram maiores nos manejos conservacionistas. Não houve correlações entre o RG e a MS e os atributos de solo avaliados, em ambas as camadas, mesmo havendo diferenças de níveis de restrição físicas e químicas entre as camadas. Os atributos físicos e químicos do solo não foram influenciados pela interação dos fatores estudados, sendo pouco influenciados pela rotação de culturas. Em todos os tratamentos, os resultados dos atributos físicos indicaram uma camada superficial (0 a 6,7 cm) não compactada e outra subsuperficial (6,8 a 20 cm) compactada. Na camada não compactada, as diferenças dos atributos físicos não foram agronomicamente importantes, dos atributos em função dos tratamentos testados, mas os atributos químicos (Ca, P, K, Zn e a CTC potencial) foram favorecidos pelos manejos conservacionistas. Na camada compactada, o PD propiciou valor nulo do intervalo hídrico ótimo. Nesta camada, em todos os tratamentos, os valores dos atributos de acidez determinados no solo e na solução do solo foram restritivos ao desenvolvimento de

plantas. O PD propiciou maiores valores de carbono orgânico dissolvido e menor teor e atividade de Al na solução do solo, amenizando a toxidez de Al.

Palavras-chave: plantio direto, compactação, solução do solo, culturas de grãos, acidez do solo, calagem.

**CHEMICAL AND PHYSICAL ATTRIBUTES OF A TROPICAL
OXISOL AND CROP PRODUCTIVITY IN FUNCTION OF
SOIL TILLAGE AND CROP ROTATION**

**SILVIO TULIO SPERA, PEDRO ALEXANDRE VARELLA
ESCOSTEGUY, JOSÉ ELOIR DENARDIN**

ABSTRACT – The vegetal production is influenced by the soil tillage and by crop rotation. The effect of the interaction of these factors, along the years of cropping, on the grain yields (GY) and on the soil attributes, of the layers explored by the roots of the crops, is not well known. The objective of the work was to evaluate the interaction of these two factors on the GY, crop production, and on the physical and chemical, attributes of two soil layers. The experiment was carried out on a dystrophic Red Latosol (Haplustox), after more than two decades of cropping without liming. It was lead in the Embrapa Trigo, southernmost region of Brazil, and a randomized block design with split plot schedule was used. The following treatments were evaluated: no-till (PD), chisel plow tillage (PM), and conventional plough tillage (PC). These treatments were combined with the crop rotations: wheat/soybean (R1); wheat/soybean-vetch/sorghum (R2) and

wheat/soybean-vetch/sorghum-white oat/soybean (R3), to evaluate the effect on the GY and the shoot dry mass (DM) of both the summer and winter crops. The effect of these factors on the soil attributes and macro-morphologic characteristics was also evaluated as a function of the soil layer analyzed (0 to 6.7 and 6.8 to 20 cm). The physical and chemical attributes were not influenced by the interaction of the studied factors and were less affected by the crop rotation. In all treatments, the physical attributes indicated a not compacted superficial layer (0 to 6.7 cm) and a compacted subsurface layer (6.8 to 20 cm). In the not compacted layer, there were not important differences between for treatments physical attributes, but in the PD and PM treatments showed best relevant chemical attributes values (Ca, K, P, Zn and potential CEC) for crop development of evaluated species. The highest values of soil density and the lowest values of macro porosity and the best least limiting water range were found in the compact layer of the PD and PM treatments. In the compact layer of the PD they had increased contents of Mn, and values of CTC. In the soil solution, the PD provided best accumulations of dissolved organic carbon, and lesser percent and activity of Al. The PD mitigated the Al toxicity in the soil solution, in comparison of the other managements. In all treatments and two soil layers, the acidity level of soil and soil solution was restrictive to the development of the evaluated plants. The GY did not vary with the soil tillage, except the sorghum crop; nor with the crop rotation, except the GY of wheat. In evaluated year (2007), the yield of white oats and vetch did not changed with the studied factors, as well as with the interactions between the factors. The crop rotations with four or more species (R2

and R3) increased the production of DM. Non-strong correlations were found between crop yields and chemical and physical attributes of soils, in both layers, even and there are differences in levels of chemical and physical restriction of layers.

Keywords: soil tillage, soil compaction, soil solution, crop soil profile.

1. INTRODUÇÃO

Até meados dos anos 1980, a erosão hídrica era o principal fator que limitava as lavouras de grãos do rio Grande do Sul (RS), principalmente, nas regiões do Planalto e das Missões, no norte do Estado. A implantação do sistema plantio direto, a partir do final da década de 1980, foi uma solução para este problema, mesmo que o conhecimento tecnológico sobre este sistema ainda era restrito. Naquela época, diversos experimentos de curta duração foram instalados no RS, a maioria deles comparando tipos de manejo de solo e estratégias de rotação de culturas, no contexto da realidade de lavoura e dos conhecimentos disponível até então. Por outro lado, experimentos de longa duração são essenciais para avaliar respostas cumulativas de tratamentos, como o efeito de tipos de manejo de solo.

As conclusões obtidas nos experimentos de manejo de solo relatados na literatura são restritas às mudanças das características de solo ou ao RG e de MS, sendo necessário avaliar as inter-relações dos aspectos físicos, químicos e biológicos do solo submetido a diferentes manejos.

Como isto não tem sido considerado, esta lacuna contribui para que as respostas das plantas submetidas a diferentes tipos de manejo sejam variáveis. Assim, quando os sistemas conservacionistas são comparados com o preparo convencional, tem sido observado aumento do RG, ora nos sistemas conservacionistas, ora nos manejos convencionais (SANTOS et al., 1995; YUSUF et al., 1999; SANTOS et al., 2001; PAULETTI et al., 2003; PEDERSEN e LAUER, 2003; SANTOS et al., 2006).

De acordo com a literatura, os tipos de manejo conservacionistas, quando comparados ao preparo convencional promovem, de modo distinto, alterações físicas, químicas e biológicas ao solo (SCHULZE e STOTT, 1997). Por outro lado, pode-se supor que estas alterações podem interagir no RG e na MS das culturas, geralmente, com resultados favoráveis. Desta forma, os estudos destes efeitos ainda não foram totalmente esgotados, quando comparados ao montante de informações obtidas em manejos convencionais, ao longo de cerca de um século. No RS, estudos de longa duração vêm sendo conduzidos há mais de 25 anos com sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. Os resultados destes estudos têm mostrado que culturas manejadas com sistemas conservacionistas de solo, geralmente, apresentam maiores ou iguais RG, em relação àquelas manejadas com PC, mesmo quando tais sistemas conservacionistas apresentem restrições físicas e ou químicas do solo (geralmente compactação e acidez em subsuperfície) (PAULETTI et al., 2003; SANTOS et al., 2006).

Assim, é necessário avaliar as alterações nos atributos de solos, submetidos a distintos tipos de manejo e cultivados com diferentes rotações de culturas, durante vários anos, principalmente, quando ainda se considera a necessidade de se estudar os atributos da solução do solo e o ambiente físico do solo, além da inter-relação entre atributos físicos e químicos e da relação destes com o RG e a MS das plantas.

O presente estudo foi conduzido em um experimento de longa duração (22 anos), cujos tratamentos incluem tipos de manejo de solo e seqüências de rotações de culturas de grãos, o qual possui

como característica peculiar, a não realização da calagem, embora os valores de saturação por alumínio e por bases indicavam o contrário.

Este trabalho de pesquisa baseou-se na hipótese geral de que a interação entre os tipos de manejos de solo e de rotações de culturas ou os efeitos isolados destes fatores, após mais de vinte anos, produzem alterações edáficas que diferem entre duas camadas distintas do solo, interferindo no RG e na MS das plantas. As seguintes hipóteses foram estudadas:

- a) hipótese 1: os valores dos atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) variam com a interação entre manejo de solo e rotação de culturas, ou com o efeito isolado destes fatores, promovendo diferenças entre duas camadas consecutivas de solo avaliadas, morfologicamente distintas quando previamente identificadas em perfis culturais. Estas diferenças assumem graus de restrição, os quais interferem na produção das culturas de grãos;
- b) hipótese 2: o RG e a MS das plantas variam com a interação entre manejo de solo e rotação de culturas, ou com o efeito isolado destes dois fatores, sendo influenciados pelos valores dos atributos de solo, que são distintos entre as duas camadas de solo consecutivas do perfil cultural.

Para testar essas hipóteses, os objetivos gerais deste trabalho foram:

- 1) investigar as alterações provocadas por tipos de manejo de solo e por rotações de culturas nos atributos de solo e os efeitos combinados destes fatores em duas camadas consecutivas de solo, quanto ao nível de restrições edáficas, no RG e de MS das plantas de um experimento instalado, em 1989, em um Latossolo Vermelho distrófico húmico

argiloso;

2) gerar subsídios para o manejo de solo e a produção de culturas de grãos, em um LVd.

Os objetivos específicos consistiram em avaliar duas camadas morfológicamente distintas de um LVd, após 22 anos de cultivo sem calagem, quanto às alterações dos atributos físicos, químicos e da solução do solo (químicos), causadas pela interação entre manejo de solo (PD, PC e PM) e rotações de culturas (trigo e soja; trigo e soja, ervilhaca e sorgo; trigo e soja, ervilhaca e sorgo e, aveia branca e soja) nas camadas de solo avaliadas.

Além disto, objetivou-se avaliar os efeitos destas alterações sobre os RG e o teor de MS das plantas de grãos em função da interação entre manejo de solo (PD, PC e PM) e rotações de culturas (trigo e soja; trigo e soja, ervilhaca e sorgo; trigo e soja, ervilhaca e sorgo e, aveia branca e soja).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A principal razão dos baixos rendimentos de grãos na safra de verão da agricultura do Rio Grande do Sul é a freqüente ocorrência de períodos com deficiências hídricas, durante a fase de enchimento de grãos, fato corroborado por Cunha et al. (1998). Porém, podem ser atribuídas, entre outras razões secundárias, as limitações químicas, físicas e biológicas dos solos. Martinazzo (2006) em diagnóstico da fertilidade do solo em sistema plantio direto no RS destaca que a menor média de rendimento de soja do país, pode ser atribuída à limitação da fertilidade do solo, em especial a acidez em subsuperfície e, raramente, a deficiência de P, agravadas pela presença de camadas compactadas que dificultam o aprofundamento do sistema radicular.

2.1 Alterações da estrutura de solos cultivados

A estrutura do solo de acordo com SSSA (2008) é a combinação física do material do solo expressa pela dimensão, forma e arranjo das partículas sólidas e poros a elas associados, incluindo partículas primárias e as originadas pela união delas, formando unidades secundárias caracterizadas pelo tamanho, morfologia e grau de distinção. A estrutura do solo também é referida como o arranjo das partículas e a aglomeração destas, formando agregados maiores, e desenvolvendo espaço poroso. Oliveira (2008) salienta que a presença de uma malha ideal de poros, com ampla variação dos diâmetros, é um fator importante na fertilidade do solo, pois afeta as relações entre drenagem, teor de água disponível para as plantas, absorção de nutrientes, penetração de raízes, suprimento de O₂ às raízes,

temperatura, com implicações na produção das culturas.

As alterações físicas que ocorrem na estrutura do solo são evidenciadas por modificações na densidade, que afetam a resistência do solo à penetração, a porosidade e a permeabilidade ao ar e à água. Como consequência, ocorre alterações na capacidade de armazenagem e disponibilidade de água as plantas, na dinâmica da água da superfície e no perfil do solo, bem como na consistência e na compactabilidade do solo. A avaliação da estrutura do solo cultivado é de difícil execução, pois as análises físicas tradicionais fornecem informações isoladas, sem a possibilidade de se construir uma idéia da condição estrutural como um todo (NEVES et al., 2003). Além disso, é raro encontrar relação direta entre análises e rendimento de culturas (SPERA et al., 2004).

Em um estudo das modificações de um Latossolo Vermelho distroférico, Piccinin (2005) observou que as alterações mais acentuadas ocorreram nas camadas superficiais, com maior variabilidade horizontal de unidades estruturais entre os 5 e 25 cm de profundidade e decréscimo da compactação do solo na subsuperfície abaixo dos 25 cm. As alterações geraram compactação que se desenvolveu horizontalmente e afetou principalmente os espaços intra-agregados. As condições de adequada estruturação de um solo submetido à rotação de culturas com milho e nabo mostraram maior similaridade com as observadas em solo sob vegetação natural. Pereira Neto et al. (2007) constataram que a consolidação estrutural de um Latossolo Vermelho típico manejado com sistema plantio direto, em uma área que foi manejada por décadas com revolvimento, ocorre no décimo ano após a implantação do sistema.

2.2 Atributos físicos do solo sujeitos a alterações

A densidade do solo ainda é um dos indicadores do grau de compactação de um solo. Em solos de textura argilosa, a estrutura apresenta arranjo mais poroso e os valores de densidade do solo variam de 0,90 a 1,60 Mg m⁻³ – megagrama por m⁻³- (REICHARDT e TIMM, 2004). O aumento da densidade do solo, devido ao manejo, pode reduzir o rendimento de culturas, especialmente em condições de déficit hídrico prolongado durante o ciclo de desenvolvimento das culturas. O manejo do solo afeta a estrutura, alterando a densidade e, em consequência, a porosidade, a distribuição dos poros por classe de tamanho e a resistência à penetração (SUZUKI e ALVES, 2004). Geralmente, solos manejados com plantio direto apresentam densidade mais elevada do que os manejados com revolvimento (KLEIN, 2008).

A densidade do solo tem sido avaliada com objetivo de se conhecer a densidade relativa do solo (DR) que é usada para caracterizar o estado de compactação, sendo esta menos influenciada pelas características dos minerais no solo e independente do tipo e granulometria (HAKANSSON e LIPIEC, 2000), a qual elimina as diferenças de resposta das culturas entre solos. Essa consiste na divisão da densidade do solo atual pela densidade máxima do solo obtida pelo teste de Proctor (CARTER, 1990). A utilização da DR é uma forma de evitar essas diferenças entre solos, permitindo compará-los quantitativamente. Valores de DR acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas e abaixo de 0,80 podem afetar o rendimento de algumas culturas de cereais em

conseqüência da redução da capacidade de armazenamento de água no solo (HAKANSSON e LIPIEC, 2000).

As alterações estruturais causadas pelo uso agrícola se caracterizam pela redução da porosidade total em resposta ao pequeno aumento da microporosidade e redução acentuada dos poros de maior diâmetro (DEXTER, 2004). A alteração da estrutura do solo leva à limitação da qualidade física do solo para o desenvolvimento radicular. Estas alterações se intensificam com o tráfego contínuo de máquinas e baixa frequência ou ausência de revolvimento do solo, como no sistema plantio direto. Desta forma, na avaliação e o monitoramento da qualidade física do solo têm sido realizada por meio de atributos físicos, além da densidade, também a porosidade, a estabilidade de agregados, a infiltração e a retenção de água do solo. No entanto, é difícil estabelecer uma relação funcional desses atributos com a produção das culturas (BEUTLER, 2006).

A curva característica de retenção de água é uma propriedade física do solo que relaciona o conteúdo volumétrico de água e o potencial matricial do solo, e tem sido utilizada para se obter estimativas da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva (MELLO et al., 2002), para avaliar o efeito do potencial de água no solo sobre o rendimento de culturas (OLIVEIRA et al., 1999), geração de modelos matemáticos (modelagem) para predição de parâmetros da equação de van Genuchten (MELLO et al., 2005). A avaliação da capacidade de drenagem e de infiltração de solos também pode ser obtida a partir da curva característica da água do solo (MELLO et al., 2002).

O desenvolvimento adequado das plantas, dentre outras

variáveis, é função da disponibilidade de água, contato solo-raízes, espaço poroso suficiente ao movimento de água, nutrientes e gases e resistência à penetração que não comprometa o crescimento radicular. Desta forma, o conteúdo de água, a aeração e a resistência do solo à penetração, prejudicam diretamente o crescimento radicular e a produtividade das culturas (LETEY, 1985). A partir destas variáveis, o autor desenvolveu um modelo para integrar esses atributos físicos em um único parâmetro. Posteriormente, foi introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998) e denominado intervalo hídrico ótimo (IHO).

O IHO é definido pelos limites superiores e inferiores de conteúdos de água no solo, considerados limitantes ao crescimento radicular. Os limites superiores são o menor valor entre o conteúdo de água na porosidade de aeração de 10% (ZOU et al., 2000) e o conteúdo de água retida na capacidade de campo, na tensão de 10 kPa. O limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água retida no ponto de murcha permanente na tensão de 1500 kPa (SAVAGE et al., 1996) e também o conteúdo de água a partir do qual a resistência do solo à penetração (RP) é crítica ao crescimento radicular (2 MPa).

Se os valores dos atributos físicos utilizados na quantificação do IHO encontrarem-se aquém dos níveis limitantes ao crescimento radicular e, se o conteúdo de água estiver dentro dos limites anteriormente descritos, o solo então apresenta adequada qualidade física e poucas restrições ao crescimento das plantas. Silva e Kay (1996) estudaram a relação do IHO com a produtividade de milho e verificaram que o crescimento das plantas foi positivamente correlacionado com o IHO, ou seja, a produtividade foi maior quando o conteúdo de água permaneceu dentro dos limites adequados do IHO.

Em solos tropicais, no Brasil, Beutler et al. (2004, 2006), avaliaram a qualidade física do solo para a produção de soja e arroz de sequeiro, em casa de vegetação, utilizando o IHO e constataram que este não só apresentou relação positiva com a produtividade dessas culturas, mas variou com o tipo de solo.

A condutividade hidráulica do solo saturado (CHSS) é a propriedade do solo em conduzir água, sendo definida pela relação entre a densidade do fluxo de água e o gradiente hidráulico (CURI et al., 1993). A condutividade hidráulica do solo saturado fornece informações para a caracterização do movimento da água no solo. É um parâmetro dependente da quantidade, da continuidade e do tamanho dos poros, o que o torna importante para comparação de efeito de sistemas de manejo do solo sobre a movimentação e distribuição de água no perfil do solo (ANGELOTTI NETTO e FERNANDES, 2005). Libardi (2005) e Klein (2008) destacam que a camada de menor valor de CHSS determina a infiltração da água desde a superfície do solo. Klein e Libardi (2002) relataram que a condutividade hidráulica do solo saturado é um atributo altamente influenciado pelo manejo.

2.3 Efeitos da degradação dos atributos físicos do solo

A degradação estrutural do solo altera as relações entre ar, água e temperatura do solo, afetando a disponibilidade de nutrientes e o crescimento de raízes, e conseqüentemente, o rendimento das culturas (CAMARGO e ALLEONI, 1997). O aumento de densidade do solo causa alterações na quantidade de água retida no solo, em função da diminuição do volume de macroporos, especialmente os

responsáveis pela drenagem rápida. Causa também aumento do volume de microporos (poros $<2 \mu\text{m}$). A compactação aumenta a quantidade de água na faixa entre 0,01 e 0,1 MPa, mas ocorre decréscimo na água disponível. A diminuição do volume de macroporos em 50% causa diminuição na condutividade hidráulica. Isto considerando que não houve prejuízo na continuidade de poros, que possibilitam o fluxo de água (LIBARDI, 2005).

Nas camadas compactadas de solos com degradação estrutural, observa-se descontinuidade acentuada da porosidade do solo, dificultando o fluxo de água, mesmo com uma distribuição de tamanho de poros não restritiva ao desenvolvimento radicular (RIBEIRO et al., 2007). Essas alterações podem ser agravadas pelo aumento da resistência do solo ao crescimento de raízes ou a diminuição da porosidade de aeração (FREITAS, 2005).

Em condições de inadequada aeração, a absorção de água pelas raízes torna-se deficiente. A redução de entrada de água na planta é atribuída ao fato de ocorrer, uma alta pressão parcial de gás carbônico. Elevada concentração de CO_2 e baixa de O_2 , conferida pela aeração deficiente, pode reduzir a capacidade das raízes de absorverem nutrientes, principalmente o potássio (LIBARDI, 2005).

A compactação de solo tem sido apontada como a principal causa de redução de aeração de solos cultivados não inundados (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Goedert et al. (2002) destacam que o processo de compactação do solo aumenta a densidade e reduz o espaço poroso total, e como resultado, as propriedades do solo relativas à composição porosa são significativamente alteradas. No solo, a difusão do ar é reduzida devido à tortuosidade dos poros

contínuos disponíveis e ao espaço poroso efetivo. O tamanho dos poros não chega a ser crítico, mas a continuidade sim, uma vez que o diâmetro médio dos condutos livres para as moléculas gasosas é muito menor que o dos poros envolvidos (SILVA e CABEDA, 2006).

O tráfego de máquinas e implementos nas operações de preparo, semeadura, adubação, tratamentos fitossanitários e colheita é o mais importante agente de compactação de solos. Em ensaio sobre tráfego de máquinas em solo argiloso, Beutler et al. (2003) observaram que o manejo intensivo promoveu diminuição da macroporosidade, na permeabilidade do ar e na difusão de gases do solo. Outra forma de redução da porosidade de aeração do solo é acarretada pela saturação por água, por inundação temporária (SILVA e CABEDA, 2006).

Quando há restrição da aeração, os processos respiratórios que ocorrem no solo aumentam o uso de O_2 e produzem CO_2 bem mais rápido do que poderia ser trocado com a atmosfera; o resultado é uma redução líquida do O_2 e aumento do CO_2 no solo. Porém, nem todas as plantas respondem da mesma maneira à deficiência de oxigênio ou ao excesso de dióxido de carbono (JONG VAN LIER, 2001). Plântulas são mais suscetíveis. Torres et al. (2004) constataram morte de raízes de plântulas de soja por deficiência de aeração.

O crescimento de plantas pode ser alterado por alguns fatores restritivos que são encontrados pelas raízes neste ambiente. Vários estudos têm mostrado que a elevada resistência mecânica do solo é um dos mais importantes fatores de estresse uma vez que pode afetar o crescimento de plantas reduzindo a taxa de alongamento de raízes (ZOU et al., 2000), ainda que se saiba muito pouco do efeito da

resistência mecânica do solo no desenvolvimento de caules e raízes. A elevada resistência mecânica do solo está estreitamente relacionada com outro principal fator de estresse: o reduzido volume da porosidade de aeração do solo, que promove efeitos restritivos ao crescimento de plantas (PASSIOURA, 2002).

Silva et al. (2004b) verificaram, em solos com teor de argila variando de 6 a 37%, manejados com preparo convencional e com sistema plantio direto, aumento de crescimento de plantas, com aumento da porosidade de aeração do solo. Observaram, porém que o maior valor para crescimento de plantas foi obtido com o sistema plantio direto. Diaz-Zorita et al. (2005) relataram que solos submetidos a menores esforços de compactação apresentaram porosidade de aeração quase três vezes maior que solos submetidos a esforços leves de compactação, independente do tamanho dos agregados do solo. A densidade e o comprimento de raízes de plântulas de milho, parâmetros usados para avaliar a elongamento de raízes, foram maiores em condições de menor compactação e, portanto, de maior porosidade de aeração do solo.

2.3.1 Caracterização da compactação de solos

O solo compactado apresenta dois problemas cruciais: dificuldade de desenvolvimento de raízes e impedimento da infiltração e ascensão de água no perfil do solo (CAMARA e KLEIN, 2005). No sistema plantio direto, a compactação do solo na camada superficial é decorrente da intensa atividade antrópica relacionada às atividades agropecuárias. Freitas (2005) relata que em solos cultivados com plantio direto, inicialmente sofrem compactação devido ao tráfego de

máquinas e implementos, além de uma consolidação natural, apresentando maior densidade na camada superior, a qual diminui com a profundidade, principalmente em solos argilosos. Com o passar dos anos, a densidade do solo no plantio direto pode vir a diminuir, em parte, pelo aumento do nível de matéria orgânica na camada superficial, que favorece o desenvolvimento da estrutura do solo (STRECK, 2003). De acordo com Spera et al. (2005), a camada superficial do solo submetido ao sistema plantio direto apresenta maior compactação de 7 a 20 cm.

O solo compactado tem como conseqüências adicionais, aumento da erosão e a redução da disponibilidade de água, fator este intensificado pelas estiagens (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Nas camadas compactadas em solos com alta degradação estrutural, ocorre redução no fluxo de água, mesmo que a distribuição de tamanho de poros não seja restritiva (SCHAEFER et al., 2001).

O manejo de culturas com uso de rotação é de fundamental importância para evitar estes efeitos negativos. Silva e Rosolem (2001) comentam que o sistema radicular de aveia preta, milheto, sorgo, guandu, mucuna preta e tremoço são considerados na literatura como re-estruturadores do solo, porém, até a densidade do solo atingir $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$. A elevada compactação imposta não impede o crescimento de raízes, entretanto, nos níveis de maior densidade, o crescimento é reduzido.

2.3.2 A consolidação da compactação do solo

Um possível fator de degradação do solo, na forma de compactação por cimentação fraca, oriunda da dissolução de formas

amorfos de óxidos de ferro e de alumínio, foi admitido por Resende et al. (2002), que afirmam que menores quantidades de óxidos de Fe tendem a manter a estrutura de latossolos afastadas do tipo granular. Esta observação foi corroborada por Araújo Filho (2004), que caracterizou os agentes cimentantes com base em extrações seletivas de fases amorfas pelo método do oxalato de amônio (Fe_o e Al_o). O autor constatou que o balanço geoquímico de massa em geral foi indicativo do acúmulo de Al nos horizontes cimentados, constituídos essencialmente por caulinita e quartzo, constatando que os agentes cimentantes principais são compostos silicosos, mas sempre acompanhados por alumínio. Entretanto, foram encontrados nas camadas cimentadas, níveis de alumínio amorfo extraído pelo oxalato de amônio, variando de $7,0 \text{ g kg}^{-1}$, para cimentação fraca, e acima de $12,0 \text{ g kg}^{-1}$, para cimentação forte.

O Fe_o também foi avaliado como possível agente cimentante, mas somente valores acima de $4,0 \text{ g kg}^{-1}$, em cimentação fraca, foram associadas à formação de camadas cimentantes. Esses valores coincidem com os encontrados por Coelho e Vidal-Torrado (2003) em estudo de Argissolos com cimentação.

De acordo com Kämpf e Curi (2003), os aluminossilicatos mal-cristalizados, mesmo os que ocorrem em estado não cristalino seriam originados apenas do intemperismo de minerais do solo, ainda que na forma de íons e polímeros de hidróxi-Al. Para os autores, a quantidade de Al para preencher espaços interlaminares e, assim, contribuir para cimentação de camadas compactadas deveria ser significativa. O alumínio neutralizado pela calagem não deve ser suficiente para provocar tal processo.

2.4 Atributos químicos do solo sujeitos a alterações

2.4.1 Componentes da acidez

Os latossolos são, normalmente, muito intemperizados, ácidos e apresentam elevados teores de Al e Mn que podem prejudicar o crescimento da maioria das plantas cultivadas e reduzir o rendimento. Os solos do norte do Rio Grande do Sul, região subtropical úmida, possuem estas condições (BRASIL, 1973). A acidez é produto dos agentes de intemperismo e está sempre presente no solo. Os cátions mais solúveis (Na, Ca, Mg e K) são permanentemente carregados, enquanto aqueles que formam compostos menos solúveis vão se acumulando, entre eles o Al. Outra fonte de acidez a ser neutralizada pela calagem é o manganês divalente, que pode como o alumínio, participar de reações de hidrólise, gerando H^+ , ou competir com o Ca e o Mg pelos sítios de carga negativa nas partículas do solo (BOHNEN, 2000).

O sistema plantio direto promove modificações nos atributos físicos e químicos do solo. Entre essas, destaca-se o aumento no teor de C orgânico do solo, freqüentemente atribuído à manutenção da palha na superfície, além de diversos outros benefícios (BEUTLER et al., 2001; LANGE et al., 2006). À medida que é adicionado C ao solo, a atividade microbiana é estimulada, resultando em produtos que atuam na formação e estabilização dos agregados, além disso, vários trabalhos têm demonstrado que o sistema plantio direto aumenta a concentração de nutrientes na superfície do solo (OLIVEIRA et al., 2002).

Entre os nutrientes requeridos pelas culturas, o N é o mais exigido superando o P e o K. Entretanto, a aplicação de altas doses de

adubos nitrogenados, principalmente amoniacais, acidifica o solo (LANGE et al., 2006). SÁ (1999) observou redução do pH do solo após cultivo da seqüência milho-trigo. Segundo o autor, a adição de 190 kg N ha⁻¹ teria provocado acidificação no solo. O mesmo foi observado FRANCHINI et al. (2000) em seqüências de culturas que requeriam altas doses de N.

Antes da adoção do sistema plantio direto tem sido recomendada a adequação do solo para o sistema mediante a correção da acidez do solo, por meio da incorporação de corretivo na camada de 0 a 20 cm. Em solos manejados com plantio direto em estado de degradação, que apresentem acidez na camada mais profunda (de 10 a 20 cm), a correção deve atingir os 20 cm (SBCS-CQFS, 2004). Entretanto, em muitas áreas, essa correção não é adequadamente executada (OLIVEIRA et al., 2002). No Paraná, em algumas lavouras onde a correção da acidez não foi realizada adequadamente, os solos mantiveram-se por mais de dez anos com valores adequados de pH e de saturação por bases e por Al, ao menos nos 5 cm superficiais, mantendo rendimentos elevados, porém, após alguns anos, observou-se redução nos rendimentos (SÁ, 1999).

Para contornar esse problema, tem sido realizado em sistema plantio direto, a calagem apenas na superfície do solo, pois tem sido observada uma movimentação de calcário no perfil do solo (AMARAL et al., 2004), e tal movimentação é dependente das características e das condições de cada local, podendo ocorrer por meio de canais resultantes da decomposição de raízes de culturas antecedentes, da maior atividade da macrofauna, da estrutura e textura do solo e da pluviometria (POTTKER e BEN, 1998; AMARAL et al.,

2004; LANGE et al., 2006).

A reacidificação por adubos nitrogenados também tem sido constatada. A fertilização com uréia, por ser uma molécula de reação básica, inicialmente causa aumento do pH, principalmente ao redor dos grânulos do adubo. Porém, após nitrificação do amônio, o pH decresce para valores inferiores aos originais (ANGHINONI e SALET, 2000). A acidificação provocada pelo uso de adubos nitrogenados pode alterar também outros atributos químicos do solo, como aumento do teor de Al trocável, redução da CTC efetiva e das bases trocáveis e, conseqüentemente, aumentar a necessidade de calagem (FRANCHINI et al., 2000).

Há outras formas do processo de acidificação ocorrer. Grapeggia Jr. et al. (2000) estudaram o processo de reacidificação do solo em um solo, após oito anos da aplicação de calcário e verificaram maiores teores de Al nas camadas superficiais do solo, até 10 cm. Em profundidades maiores os sistemas com culturas de cobertura apresentavam menor concentração de Al do que o campo natural. Este resultado provavelmente esteja associado à incorporação do calcário com aração na implantação do experimento, pois o teor de alumínio na camada de 0 a 10 cm foi semelhante entre o campo natural e as culturas de cobertura. No entanto na camada de 10 a 20 cm o efeito residual da correção da acidez ainda foi efetivo.

O modelo de rotação de culturas que inclui leguminosas de verão favorece a ocorrência de processos mais intensos de acidificação do solo comparado ao campo natural, diferindo significativamente até a camada de 10 cm de profundidade em termos de pH. Este comportamento pode ser justificado porque as

leguminosas de verão se desenvolvem até a ocorrência das primeiras geadas, permanecendo deste modo seus resíduos na superfície do solo, durante todo o inverno, até a semeadura do milho. Portanto durante quatro meses verifica-se a decomposição dos resíduos vegetais e a liberação de N ao solo sem presença de plantas para reciclar este nutriente.

Isso estaria de acordo com um dos principais processos responsáveis pela maior acidificação do solo em seqüências de culturas contendo leguminosas: intensa nitrificação seguida da lixiviação do nitrato. A implantação de culturas de inverno, como aveia, que apresenta um rápido desenvolvimento inicial, imediatamente após a morte da leguminosa é, provavelmente a maneira mais eficaz de manter na camada de 0 a 10 cm o N proveniente da mineralização dos resíduos culturais da leguminosa e reduzir o processo de acidificação do solo.

O calcário adicionado na superfície do solo no sistema plantio direto aumenta o pH, os teores de Ca e Mg, e diminui o teor de alumínio trocável apenas até a profundidade de 5 cm, após 18 meses da aplicação. Rheinheimer et al. (2000a) observaram que a aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto, estabelecido há cinco anos com calagem incorporada no início do sistema, não aumentou os rendimentos de milho e soja.

A viabilidade da reaplicação de calcário sobre a superfície de solo no sistema plantio direto e o efeito na acidez da subsuperfície ainda merecem mais estudos. Ciotta et al. (2004) realizaram experimento de longa duração (21 anos), visando avaliar o efeito do método de reaplicação de calcário nos componentes da acidez das

fases sólida e líquida de um Latossolo Bruno alumínico manejado com sistema plantio direto e verificaram que a reaplicação de calcário promoveu melhoria no ambiente químico do solo com sistema plantio direto, evidenciada pela elevação do pH em água, dos teores de Ca e Mg trocáveis e em solução, da saturação por bases, bem como pela diminuição do teor de Al trocável. A aplicação de calcário sobre a superfície do solo no sistema plantio direto foi eficiente na elevação do pH na camada de 0 a 15 cm e na elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis e da saturação por bases, bem como na diminuição do teor de Al trocável na camada de 0 a 20 cm, não diferindo do tratamento com incorporação de calcário ao solo. A eficiência da calagem superficial na correção da acidez da camada arável do solo constitui importante indicativo da viabilidade desta prática em solos sob plantio direto de longa duração.

Martinazzo (2006) destaca a menor média de rendimento de soja do país, em função da freqüente ocorrência de períodos com deficiência hídrica que acontecem, principalmente, durante a fase de enchimento de grãos, mas aponta que outra importante causa dos baixos rendimentos dessa cultura pode ser as limitações da fertilidade do solo, em especial a acidez em subsuperfície e a deficiência de P, agravadas pela presença de camadas compactadas, que dificultam o aprofundamento do sistema radicular, agravando os danos durante o período de deficiência hídrica. A autora conclui que cerca de um quarto das áreas sob sistema plantio direto apresentam problemas de acidez na superfície do solo, porém, metade delas possui alumínio tóxico e baixa saturação por bases nas camadas inferiores, indicando haver correção efetiva somente na camada superficial. Na camada

superficial, em torno de dois terços das amostras apresentam teores de P e K acima do nível de suficiência (nível crítico) e saturação por bases considerada satisfatória. Nas camadas subsuperficiais foram também observadas limitações, onde um terço das amostras possui teores de P e K abaixo do nível de suficiência, três quartos apresentam baixa disponibilidade de P e a metade delas possuem saturação por bases inferior a 65%.

2.4.2 O alumínio no solo

O Al é um dos componentes mais importantes da acidez potencial do solo porque reage com a água, liberando íons H^+ . A acidez potencial devido ao Al trocável é observada em $pH \leq 5,5$. Em solos com $pH > 5,5$, o Al encontra-se em formas precipitadas (BOHNEN, 2000). A alta acidez dos solos do sul do Brasil, associada a uma grande concentração de alumínio, representa um sério problema para a adaptação de diferentes cereais e outras culturas. A correção do solo por calagem vem sendo realizada, e têm auxiliado muito na redução dos efeitos deletérios do Al (ANGHINONI e SALET, 2000). Entretanto, para algumas culturas, como é o caso da cevada, em anos que ocorre redução da precipitação pluvial, especialmente no período de enchimento de grãos e imediatamente anterior, a impossibilidade das raízes de plantas ultrapassarem a relativamente fina camada do solo em busca de água tem causado acentuadas quebras de safra. Por esse motivo, a avaliação de genótipos tolerantes e o controle genético da tolerância a este metal têm sido estudados na tentativa de se obter cultivares tolerantes ao Al (MENDONÇA et al., 2005).

O Al ocorre em diferentes formas químicas no solo e uma das

dificuldades em estudar os processos que ocorrem nas plantas, decorrente da ação deste metal, pode ser atribuída à complexa química do mesmo. O Al se hidrolisa em solução, de tal modo que a forma de Al trivalente (Al^{3+}) predomina em condições ácidas. O Al^{3+} é comprovadamente tóxico e estudos têm demonstrado que a inibição do crescimento da raiz é o sintoma visível mais rápido da toxicidade do Al em plantas, o que resulta na redução e em danos ao sistema radicular, podendo conduzir à deficiência mineral e estresse hídrico (ANGHINONI e SALET, 2000; FLOSS, 2006). A redução do crescimento da parte aérea ocorre num momento posterior e parece ser consequência de danos que ocorrem na raiz (KOCHIAN et al., 2004).

Tem sido demonstrado que no sistema plantio direto há, em comparação ao preparo convencional, menor concentração de espécies tóxicas de Al e maior concentração de Al complexados com ligantes orgânicos, que reduzem a atividade do Al tóxico, refletindo-se em menor toxidez às plantas (SALET, 1998; ZAMBROSI, 2004). No sistema plantio direto tem sido verificado maior teor de Al solúvel em relação ao convencional, e mesmo assim, o crescimento de raízes tem sido equivalente entre os sistemas, apesar de o pH dos dois sistemas serem baixos, o Al deslocado pelo extrator é significativamente menor no sistema plantio direto (ANGHINONI e SALET, 2000).

2.4.3 A toxidez de manganês

O manganês tem sido apontado como um causador de toxidez em plantas de soja. Mascarenhas (2004) relata que em solos com acidez bem corrigida, os sintomas de toxidez em soja raramente ocorrem. A não aplicação de calcário, de acordo com as indicações

(CQFS – RS/SC, 2004), pode ter levado os solos do presente trabalho a uma condição favorável ao surgimento de toxidez de Mn, pelo menos, na cultura da soja.

A maioria dos trabalhos que tratam do Mn na nutrição de plantas se refere à toxidez, pela maior possibilidade de ocorrência, principalmente em solos com drenagem deficiente ou restringida e com valores de pH inferiores a 5,5, fatores que aumentam a disponibilidade da forma mais tóxica de Mn.

Embora em condições naturais, o teor de Mn seja elevado nos latossolos argilosos do Planalto do RS, a maioria dos solos dessa região foi modificada pelo uso agrícola. Assim, a acidez e os níveis tóxicos de Mn foram, em geral, corrigidos. Em função disso, a toxidez de Mn nesses solos não tem sido expressiva como fator limitante à produtividade das culturas de grãos, como a soja, o milho, o trigo etc. Recentes ocorrências de sintomas visuais típicos de toxidez de Mn em folhas de soja têm sido relatadas em certas lavouras cultivadas com sistema plantio direto, localizadas no Planalto do RS. Em 2005 e 2006, esses sintomas ocorreram de forma mais evidente que o observado em outros anos, quando a estiagem não foi tão expressiva. Escosteguy et al. (2006) estudaram amostras de plantas de soja com sintomas de toxidez de Mn, cujo sintoma não pode ser diagnosticado por análise de solo. Os autores observaram que a toxidez foi maior em solo compactado, com condição de possível processo de redução do Mn. Por outro lado, a análise do teor desse nutriente nas plantas, quando da manifestação dos sintomas de toxidez, possibilitou diagnosticar esse problema nas lavouras estudadas.

2.4.4 Deficiência e excesso de fósforo e de potássio

Os Latossolos contêm naturalmente baixos teores de P disponíveis às plantas e exigem adequada correção dessa deficiência para serem inseridos no processo de produção agrícola. Em virtude do caráter drenante de P desses solos serem muito superior ao caráter fonte, o solo compete com vantagens com a planta pelo P aplicado ao solo na forma de fertilizante. Embora as culturas normalmente necessitem de pequenas quantidades de P, as quantidades aplicadas ao solo são elevadas, pois uma grande parte do P aplicado é adsorvida, tornando-se pouco disponível às plantas (FLOSS, 2006).

A adoção em larga escala do sistema plantio direto geralmente ocorreu em áreas manejadas há alguns anos sob preparo convencional, que anteriormente já recebiam adubação fosfatada. Todavia, solos com baixa disponibilidade de P ofereceram maior dificuldade de manter o sistema plantio direto (RHEINHEIMER et al., 2000b). A eficiência da adubação fosfatada depende, dentre outros fatores, do teor inicial no solo, da dose de P aplicada, do volume do solo adubado e da distribuição do sistema radicular entre as posições do solo adubadas e não adubadas. No sistema plantio direto, a adubação fosfatada é efetuada a lanço, na superfície do solo, sem incorporação, ou localizada em pequena profundidade no sulco de semeadura. Isso cria distintos ambientes químicos no solo, onde uma pequena fração é abundante em P disponível e abriga a maior parte do sistema radicular e outras frações em maior volume, com menor teor de P disponível, abrigando o restante do sistema radicular (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001; OLIVEIRA et al., 2002).

As diferenças entre o plantio direto e o preparo

convencional quanto ao teor de P de diversas frações resultam da adição diferenciada de P nas camadas mais à superfície do solo, pelo efeito de diluição, embora as doses de P normalmente empregadas seja a mesma para os dois tipos de manejo, entretanto, no plantio direto o P é aplicado em superfície, sem incorporação e no preparo convencional é incorporado, geralmente na cada 0 a 20 cm (CQFS – RS/SC, 2004). No sistema plantio direto, o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e a manutenção da palha em superfície favorecem a ciclagem do P no sistema solo-planta, acumulando em camadas mais superficiais. Além disso, a adubação fosfatada, efetuada na maior parte dos casos, localizadamente, em pequena profundidade na linha de semeadura, ou a lanço, na superfície, também favorece o acúmulo de P na camada de 0 a 5 cm, dada a baixa mobilidade do P no solo (SCHLINDWEIN e ANGHINONI, 2000).

As oscilações na produção da cultura de soja verificadas no RS, as quais são atribuídas às adversidades climáticas, porém, também pode ser também devido às limitações na fertilidade do solo, com destaque para a acidez e deficiência de P na camada subsuperficial, agravadas pela presença de camadas compactadas, que dificultam o aprofundamento radicular. Martinazzo (2006) diagnosticou a situação da fertilidade do solo em áreas conduzidas com sistema plantio direto consolidado, em regiões produtoras de soja do RS. Os resultados obtidos mostraram que somente 50% das amostras de solo na camada superficial (0 a 10 cm) e 8% nas camadas mais profundas não apresentam limitações químicas conforme padrões estabelecidos pela SBCS-CQFS (2004). Em torno de 30% das amostras na camada superficial e 77% nas camadas mais profundas

apresentaram baixa disponibilidade de P. Adicionalmente, 40% das amostras nas camadas subsuperficiais mostraram P e K abaixo do nível de suficiência e somente 50% delas não apresentam problemas de acidez.

2.5 A solução do solo

A solução do solo consiste no local predominante de ocorrência das reações químicas no solo e o meio natural crescimento das plantas, além abrigar as frações químicas dos elementos imediatamente disponíveis no ambiente (WOLT, 1994). Sendo assim, o conhecimento da composição química da solução é de grande importância (CIOTTA et al., 2004), tanto para estudos de manejo ambiental, como da fertilidade do solo e da nutrição de plantas.

A composição e a força iônica da solução do solo são importantes para a maioria dos aspectos da química do solo, sendo a composição indicadora da biodisponibilidade dos nutrientes. Porém, a análise da solução do solo tem sido empregada somente em trabalhos de pesquisa e não para análise de rotina do solo, porque sua extração em condições de umidade do solo no campo apresenta grandes dificuldades metodológicas (CANCÉS et al., 2003).

O procedimento tradicional para a obtenção da solução envolve o deslocamento da solução a partir de uma coluna com solo úmido ou por centrifugação. Este procedimento requer grande quantidade de amostra de solo, consome muito tempo e demanda considerável experiência no acondicionamento das colunas (SALET, 1998). Devido às dificuldades de obtenção da solução do solo, diversas relações entre solução e extrato de solo têm sido utilizadas.

Isto está sendo possível, pois há forte correlação entre a força iônica da solução e a condutividade elétrica do extrato de solo, permitindo a predição de quantidades relativas de cátions na solução, parâmetros importantes nos estudos de nutrição de plantas (PAVAN et al., 1995; ESCOSTERGUY, 2001).

A extração da solução do solo é demorada, porque somente um pouco de amostra líquida pode ser extraída ao mesmo tempo. Isto pode levar a problemas, porque a composição da solução deve mudar substancialmente durante o período de armazenamento antes de ser obtida (WOLT, 1994). Para obtenção de resultados que se aproximem da verdadeira composição da solução do solo, a mesma deve ser extraída imediatamente após a amostragem (EDMEADES et al., 1985).

Geralmente, a força iônica da solução do solo aumenta durante o período de armazenamento ou incubação do solo. Entre os cátions, os maiores aumentos nas concentrações são normalmente observados para Ca e Mg (ZAMBROSI, 2004).

A solução do solo apresenta uma dinâmica complexa, e os elementos que se estão dissolvidos são afetados pelo efeito cinético de várias reações, como o equilíbrio entre ácido e base, complexação iônica, precipitação e dissolução de sólidos, oxidação, redução e troca iônicas (CHAVES et al., 1991). Nos solos adubados, a concentração da maioria dos cátions (Ca, Mg, K e Na) na solução é determinada pelo equilíbrio com os cátions trocáveis (SPARKS, 1995).

A calagem em solos ácidos é provavelmente a prática agrícola com o maior potencial para alterar a composição do complexo de troca e conseqüentemente da solução do solo. Em razão

do rápido equilíbrio entre as fases (sólida e líquida) do solo, os efeitos da calagem manifestam-se rapidamente sobre a dinâmica de íons em solução (AMARAL e VETORAZZO, 2005).

O problema da medida de concentração ou atividade de íons, nutrientes ou quaisquer substâncias na solução do solo tem sido abordado há muito tempo por pesquisadores interessados em ciência do solo. Entretanto, nenhuma solução satisfatória foi até hoje apresentada, provavelmente devido à própria complexidade do sistema solo-solução. O método comumente utilizado consta da agitação de certa quantidade de solo com uma solução extratora, em dada proporção e por determinado tempo. Várias críticas podem ser impostas a este procedimento, a principal dela por envolver a completa destruição do arranjo natural do sistema poroso solo-solução do solo (GLOAGUEN et al., 2009).

A solução aquosa contida nos poros do solo é um sistema dinâmico aberto, dependente de inúmeras reações que podem ocorrer simultaneamente entre as três fases que constituem o solo, as quais variam tanto com o tempo e com o espaço. Um sistema tão complexo é de difícil reconstituição em laboratório, mas, assim mesmo, muitos estudos são feitos com aplicação de princípios químicos (PÉREZ e CAMPOS, 2005).

Ainda que haja grandes dificuldades de trabalho com solução do solo, variabilidade de métodos de obtenção, dependência das condições de solo e clima, o estudo da solução com detalhamento em nível de especiação iônica contribui para elucidação de dúvidas na química do solo, principalmente no sistema plantio direto, no qual, profundas alterações ocorrem no sistema (ZAMBROSI et al., 2008).

2.5.1 Especiação iônica e atividade química dos íons em solução

A especiação química refere-se à forma como uma molécula ou íon encontra-se na solução do solo (PÉREZ e CAMPOS, 2005). A distribuição de um elemento químico em suas possíveis formas é descrita com a utilização de constantes de equilíbrio. No solo, a maioria dos íons pode estar presente na forma livre ou interagir com outros íons ou moléculas, formando pares iônicos. A solução do solo pode conter centenas de complexos solúveis diferentes. Geralmente, os cátions metálicos livres e complexados com sulfato são mais importantes em solos ácidos, enquanto os complexos com carbonato e borato destacam-se em solos alcalinos (SPOSITO, 1996).

A biodisponibilidade e o potencial tóxico dos elementos no ambiente dependem da espécie na solução do solo (CANCÉS et al., 2003). As interações que ocorrem entre os íons e moléculas fazem com que ocorra diminuição do potencial químico do íon no estado padrão e a medida desse desvio do potencial químico é denominada atividade (SSSA, 2008). A atividade, na essência, é uma quantidade sem dimensão; por convenção, a atividade de qualquer íon no estado padrão é igual a 1. Portanto, quanto o maior o número e mais intensa a interação dos íons em solução, mais reduzida será sua atividade.

A atividade de um determinado íon (a_i) é obtida pelo produto da concentração deste íon (C_i) pelo coeficiente de atividade (γ_i): $a_i = C_i \cdot \gamma_i$, enquanto que o coeficiente de atividade pode ser estimado por meio de equações como a de Debye-Hückel, baseada em leis eletrostáticas e de termo dinâmica: $\log \gamma_i = -AZ_i^2 I^{0,5}$, em que: $A = 0,509$ para água a 25° C; Z_i = valência do íon; I = força iônica da solução (SPARKS, 1995).

Na solução do solo há um enorme número de interações entre nutrientes, elementos fitotóxicos e ânions inorgânicos e orgânicos. Estes últimos desempenham papel de maior importância em sistemas naturais ou agrícolas que favorecem o acúmulo de MO no solo. Essas interações afetam a disponibilidade e a mobilidade, principalmente dos elementos catiônicos na solução do solo (CANCÉS et al., 2003).

2.5.2 Dinâmica do alumínio ligado à fase sólida do solo

Em solos ácidos, o Al existe em diferentes formas (NOVAIS e MELLO, 2007). Na fase sólida, aliado à predominância nos minerais alumino-silicatados e demais minerais de argila, o Al é encontrado ainda como íon trocável, adsorvido ou precipitado, componente de compostos hidroxilados complexos e associações organominerais (MIYAZAWA et al., 1992).

O cultivo do solo altera a relação entre as formas de alumínio do solo. Geralmente, ação antrópica diminui os teores de MO do solo pelo desbalanço entre ganhos e perdas, principalmente, pelo aumento nas taxas de decomposição (KAMINSKI e RHEINHEIRMER, 2000). No entanto, em solos manejados com plantio direto, normalmente ocorre ao invés de redução, aumento dos teores de MO. Nestes solos, o acúmulo de matéria orgânica e as interações entre os compostos orgânicos solúveis e os minerais do solo geram condições para a complexação do Al, deixando-o numa forma não tóxica as plantas. A distribuição das formas trocável e complexada com a matéria orgânica pode ser determinada mediante o uso de diferentes extratores (ZAMBROSI, 2004).

As formas trocáveis e não trocáveis têm sido referidas como Al reativo, incluindo além do Al solúvel e do efetivamente trocável, os polímeros hidróxi-Al inorgânicos positivamente carregados, adsorvidos aos colóides ou situados nas entre camadas de vermiculita, os íons Al^{+3} e íons hidróxi-Al associado com a matéria orgânica, em formas de complexos orgânicos, e as formas mais solúveis de $Al(OH)_3$ (MIYAZAWA et al., 1992). No sistema plantio direto, as formas não trocáveis de Al passam a ter uma fundamental participação no comportamento deste cátion no solo, daí a importância do conhecimento destas distintas formas de Al.

2.6 Especiação química

A especiação química de elementos é avaliada a partir da solução do solo e tem sido definida como o processo em que se determina sob quais formas uma substância, espécie, ou elemento, está ocorrendo em uma amostra, em função das interações existentes com os outros componentes da solução. A solução do solo é descrita como uma mistura de água em estado líquido e substâncias dissolvidas como sais solúveis ou gases. A solução do solo é um sistema aberto e por ser considerada uma fase, pode-se constatar que a solução do solo apresenta propriedades homogêneas macroscópicas, tais como temperatura e concentração eletrolítica e pode ser isolada do solo e analisada em laboratório (SPOSITO, 1989).

De acordo com Sparks (1995), a uniformidade das propriedades da solução do solo somente é válida para pequenos volumes de solo. Tanto horizontal como verticalmente ao longo de um perfil de solo, as propriedades químicas geralmente mostram grande

variabilidade. E, esta variabilidade espacial, somada à variabilidade temporal conduz a variações sazonais no ambiente do solo, tanto para as atividades microbiológicas como agrícolas.

Existe uma condição de equilíbrio entre os componentes da solução do solo e os componentes da fase sólida e, nesta interface, fase sólida-fase líquida ocorre importantes reações químicas, com transferência de espécies de elementos de uma fase para outra (SPOSITO, 1989).

O estudo e caracterização da composição da solução do solo podem ser destinados à predição de transformações e reações de sorção, dissolução e precipitação que podem ocorrer no solo. A análise química da solução do solo permite identificar as formas e quantidades de elementos químicos que são adicionados ao solo e, também, a quantidade de elementos que são transferidas para outros compartimentos do ambiente, mediante transporte pelo lençol freático (MEURER e ANGHINONI, 2006).

A dinâmica dos íons no solo tem sido estudada com base em determinação de cátions e ânions na solução que os contêm. Na solução, os íons ocorrem sob diferentes formas de reações e interações que alteram o potencial químico dos íons livres. Assim, os íons podem ser complexados, polimerizados ou precipitados por ânions orgânicos e inorgânicos, alterando suas espécies químicas e reduzindo a atividade (SPARKS, 1995).

A solução do solo interage com as fases sólida e gasosa. A solução é o meio de onde as plantas absorvem os nutrientes e as raízes exsudam os resíduos. Os íons na solução podem ser adsorvidos por componentes orgânicos ou inorgânicos e os adsorvidos podem ser

dessorvidos para a solução. Elementos em concentrações supersaturadas podem precipitar na forma de mineral até o restabelecimento do equilíbrio. E, se a solução do solo ficar abaixo da concentração de equilíbrio em relação a algum mineral, esse pode se dissolver da fase sólida até o equilíbrio ser restabelecido. Os íons da solução do solo podem ser lixiviados através do perfil do solo até o nível do lençol freático, arrastados pelas águas de enxurrada, ou então serem transportados pela evapotranspiração e pelo movimento de ascensão provocado pelo ressecamento, em direção às camadas superficiais do solo (MEURER e ANGHINONI, 2006).

A composição da solução do solo apresenta muita variação, tanto no espaço como no tempo. A composição da solução é dependente do material de origem do solo, do pH, das condições de oxi-redução, do teor de matéria orgânica, da adição de produtos químicos (principalmente corretivos e fertilizantes) e da seqüência de culturas. Os principais íons normalmente presentes na solução de solos não inundados, com pH próximo a neutralidade e teor médio de matéria orgânica, são: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Fe^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} e $\text{Si}(\text{OH})_4^0$. Em solos ácidos ocorrem ainda Al^{3+} e H^+ . Os íons que ocorrem em menores concentrações na solução do solo são: B, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo Ni, Pb e Zn (SPOSITO, 1989; MEURER e ANGHINONI, 2006). A composição do solo varia, também, com o clima: em solos de regiões temperadas a composição da solução é diferente das que ocorrem em solos tropicais, onde as temperaturas mais elevadas provocam processos de intemperismo mais acentuado.

2.6.1 Moléculas orgânicas na solução do solo

O carbono orgânico dissolvido na solução do solo é um componente que afeta a composição química, as formas (espécies) e a atividade dos íons que se encontram na solução. O “carbono orgânico dissolvido - COD” compreende uma variedade de tipos de moléculas orgânicas de baixo peso molecular dissolvidas na solução e de moléculas de alto peso molecular, como colóides em suspensão, resultantes da atividade bioquímica de organismos vivos, incluindo os exsudatos de raízes e os produtos da decomposição microbiana (MEURER e ANGHINONI, 2006).

Estas moléculas podem estar carregadas, positivamente ou negativamente, ou neutras. Assim, elas podem ser adsorvidas pelos sítios de troca da fase sólida do solo, formar complexos com óxidos de ferro e de alumínio. Os compostos orgânicos de carga neutra podem ser adsorvidos pela matéria orgânica do solo (MEURER et al., 2006).

As reações das moléculas orgânicas dissolvidas na solução do solo com cátions têm muita importância agronômica, ao se considerar que as reações de complexação podem aumentar a disponibilidade de micronutrientes para as plantas, como ferro, cobre e zinco, por exemplo, diminuir a fitotoxicidade de outros, como, por exemplo, a complexação do alumínio, e aumentar a mobilidade de elementos tóxicos do meio ambiente, como cádmio e chumbo (MEURER e ANGHINONI, 2006).

2.6.2 Especificação química de elementos

Os solos quimicamente férteis são capazes de suprir as plantas com nutrientes essenciais. Entre os 17 nutrientes, 14 são

obtidos do solo, que é a fonte natural de todos os demais elementos a partir do intemperismo do material de origem e do fornecimento por fertilizantes. Os elementos essenciais podem ser agrupados de várias maneiras. De acordo com as propriedades eletroquímicas podem ser agrupados como: (a) Ca, Mg, K, Fe, Mn, Zn, Cu e N que são aqueles que formam cátions, e (b) N, P, S, B, Mo e Cl os quais formam ânions. Os elementos também podem ser agrupados conforme o potencial iônico do elemento, os quais são obtidos a partir da razão entre a valência e o raio iônico, assim seriam separados da seguinte forma: (i) Ca, Mg, K, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn, Cu e Ni ($\text{IP} < 3.0$) que são aqueles simplesmente dissolvidos em uma solução aquosa; (ii) Fe, Mn^{3+} , Mn^{4+} e Al ($3.0 < \text{IP} < 9.5$), que são aqueles que se hidrolisam em pH 7; e (iii) N, P, S, B e Mo ($\text{IP} > 9.5$) que são aqueles capazes de formar oxianions (FONTES e ALLEONI, 2006).

O Al tem sido o elemento mais estudado mediante especiação, principalmente no sistema plantio direto, pois desde o estudo de Salet (1998), que verificou que apesar do elemento mostrar no sistema plantio direto maior teor na solução do solo, e mostrou no sistema, menor toxicidade. A partir daí, maior atenção às espécies químicas foi dirigida ao sistema (NOLLA e ANGHINONI, 2006).

O Al, devido à carga trivalente, pequeno raio iônico e eletronegatividade elevada, tende a estar sempre ligado a um ânion inorgânico ou orgânico na solução do solo, e praticamente todo alumínio da solução pode estar complexado a ligantes, o que justifica estudar a forma química, não só do alumínio, como de outros elementos nutrientes P, Ca, N- NO_3 , Cl, F, K, Na, Fe, Mn e COD (STAATS, 2005; ZAMBROSI et al., 2007).

Atualmente estudos têm sido dirigidos ao manejo da acidez em solos com sistema plantio direto devido ao limitado movimento de calcário aplicado na superfície desse sistema (AMARAL et al., 2004). As interações entre alumínio trocável e a matéria orgânica do solo tem sido reconhecida há muitos anos, mas as informações de pesquisa disponíveis são limitadas e pouco se sabe sobre como estas interações poderiam afetar as decisões sobre manejo para solos sob sistema plantio direto. Godsey et al. (2007) conduziram estudos para identificar os efeitos de rotações e de manejo no pH e no conteúdo de carbono orgânico de solo em razão do limitado movimento do calcário no plantio direto e verificaram que o pH e o carbono orgânico do solo foram influenciados pela rotação e pelo manejo, principalmente na camada mais à superfície.

Godsey et al. (2007) verificaram ainda que a diferença do valor de concentração de carbono orgânico, de $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ a mais para o plantio direto não aliviou o efeito da toxicidade do Al, se o pH continuava muito ácido, discordando de Salet et al. (1999).

2.6.3 Especiação química do alumínio

O alumínio da solução do solo pode ocorrer na forma livre, complexado com hidróxidos [AlOH^{2+} , Al(OH)_2^+ , Al(OH)_3^0 e Al(OH)_4^-], com o sulfato (AlSO_4^+) e, ainda, pode se apresentar na forma de polímeros - polinúcleos de Al (ROSSIELO e JACOB NETTO, 2006). O somatório das diferentes formas químicas de alumínio representa a concentração total do elemento na solução do solo. A distribuição de um elemento químico, nas formas possíveis permitidas pelas condições do meio, pode ser descrita com a utilização

de constantes de equilíbrio (SPARKS, 1995), também denominadas constantes de estabilidade do complexo (item 4.1). Essas constantes são obtidas em experimentos com soluções simples contendo poucos íons e variam com a força iônica e a temperatura da solução (SPOSITO, 1989; SPOSITO, 1996). Essas constantes constam nos programas computacionais destinados à estimativa das espécies em solução de solo, sendo que, quanto maior o valor da constante de equilíbrio ($^{\circ}K_E$), maior será a estabilidade do complexo Al-ligante (SALET, 1998).

Para complexos com ligantes inorgânicos, a efetividade da ligação é maior com o flúor, que forma um complexo de esfera interna. O fósforo pode complexar o alumínio nas formas $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-} (ROSSIELO e JACOB NETTO, 2006). Em pH menor que 6,0 predomina o primeiro. O íon sulfato pode formar complexos de esfera interna ou externa com o alumínio, dependendo da concentração do ligante. Na solução do solo, a forma predominante ligação do $AlSO_4^+$ parece ser o complexo de esfera externa (SPOSITO, 1996; SALET, 1998). Os ligantes orgânicos apresentam grande variação na efetividade de complexação do alumínio, devido às diferenças estruturais e grupos funcionais existentes entre os ligantes. As constantes de estabilidade variam muito também entre os grupos funcionais. Os polímeros de Al também têm sido estudados. O efeito tóxico às plantas, de polinúcleos de hidróxidos de Al foi constatado em diversos estudos (SALET, 1998; ROSSIELO e JACOB NETTO, 2006). Os polímeros de alumínio exigem condições especiais no solo para ocorrerem, como os microambientes ao redor de calcário em solos ácidos e nos espaços livres aparentes das células radiculares. O

sistema plantio direto apresenta algumas condições onde se especula a presença de polímeros de Al. A calagem localizada na superfície pode favorecer associação do alumínio abundante no solo, com as hidroxilas e carbonatos do calcário. Outra condição seria a movimentação de grânulos de calcário ou soluções saturadas com hidroxilas pelos canais contínuos formados por raízes ou macrorganismos, sempre presentes no plantio direto (SALET, 1998).

A presença de alumínio em quantidades tóxicas é um dos principais problemas para o crescimento das culturas. Entretanto, no sistema plantio direto, a maior quantidade de ligantes orgânicos na solução do solo e a maior força iônica da solução nesse sistema condicionam redução na atividade química do alumínio, quando comparado ao preparo convencional por revolvimento (SALET, 1998; ZAMBROSI et al., 2007)

A especiação e a atividade química de Al na solução de solo foram avaliadas em um Latossolo Vermelho após oito anos com plantio direto e preparo convencional. Os autores extraíram a solução do solo nas camadas de 0 a 5 e de 5 a 15 cm em ambos os tratamentos. Na camada de 5 a 15 cm não observaram diferenças entre os tipos de manejo quanto à composição da solução do solo (ANGHINONI e SALET, 1998). A diferença ocorreu, porém, na camada superficial, onde os efeitos do Al normalmente são mais acentuados, pois afeta a fase mais suscetível da cultura, o estágio de plântula (OLIVEIRA et al., 2002). Cerca de 70% do alumínio solúvel estava complexado por ligantes orgânicos, enquanto no preparo convencional, apenas 49% encontrava-se nessa forma. Isso pode ser parcialmente explicado pela maior quantidade de carbono orgânico dissolvido na solução do solo

no sistema plantio direto (4,4 mmol L⁻¹), em comparação com o preparo convencional (2,0 mmol L⁻¹). Outra diferença entre os sistemas é o percentual das espécies Al³⁺ e Al(OH)²⁺ consideradas tóxicas. As proporções de espécies tóxicas no preparo convencional foram em média 60% maior que as encontradas no plantio direto e a atividade química do Al livre na solução do solo com plantio direto foi menor. O fator preponderante na diminuição da atividade do Al no plantio direto foi, possivelmente, a maior quantidade de ligantes orgânicos solúveis. A força iônica teve pouca influência na atividade do Al (MEURER e ANGHINONI, 2006).

A constante adição de resíduos vegetais à superfície do solo no sistema plantio direto favorece a diminuição da toxidez por Al, devido à atuação dos processos químicos de complexação de ligantes orgânicos e de hidrólise, em função do aumento do pH do solo (ANGHINONI e SALET, 2000).

2.6.3.1 Estimativa de espécies químicas

Para se obter a especiação química de um elemento na solução do solo necessário determinar a concentração total dos metais e dos ligantes, as constantes condicionais de estabilidade dos complexos formados e a equação do balanço de massa para a concentração total do elemento, que é um trabalho, quando manual, muito demorado (SALET, 1998).

Os programas para computadores, como o Soil Solution (WOLT, 1994), o Geochem, o Mineql e o MinteqA2 (MEURER e ANGHINONI, 2006) facilitam esta tarefa, fornecendo em minutos, a estimativa das espécies e as respectivas atividades na solução do solo.

Zambrosi et al. (2007) avaliaram a especiação iônica da solução do solo de amostras de um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, manejado com plantio direto, cinco anos após a aplicação superficial de 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola. A especiação foi realizada com auxílio do programa computacional Visual Minteq em amostras coletadas nas profundidades até 40 cm. Para o Al, as principais espécies químicas foram os complexos com carbono orgânico dissolvido (Al-COD) e com F (Al-F), enquanto o par iônico AlSO₄⁺ ocorreu em pequena proporção. O COD foi o principal ligante para Mg e Ca, mas em muito maior magnitude para este último, refletindo importante participação dos ânions orgânicos na dinâmica desses nutrientes. Em relação ao sulfato, apesar da formação dos pares iônicos com Ca, Mg e Al, houve a predominância da forma livre S-SO₄²⁻, enquanto o fosfato apresentou forte interação com o Al em solução.

A maior parte do Al solúvel no sistema plantio direto encontra-se complexado como Al ligado a compostos orgânicos de diversas formas, e conseqüentemente, neste tipo de manejo a solução do solo contém menor teor de espécies tóxicas de alumínio em relação ao manejo, preparo convencional, em todas as camadas e ao cultivo com escarificador de hastes, nas camadas abaixo da superficial (SALET, 1998). A atividade do Al, portanto, é menor nas camadas superficiais dos manejos conservacionistas e menor, nas demais camadas do sistema plantio direto (ZAMBROSI, 2004).

Salet et al. (1999) estudaram o efeito da complexação do Al pelo COD, estimado por programa de especiação química, nas camadas de 0 a 5 cm e de 5 a 15 cm, em um Latossolo Vermelho

distrófico de Passo Fundo, sob plantio direto e preparo convencional, cuja calagem ocorrera há nove anos. Esse estudo mostrou que a maior parte do Al solúvel, no sistema plantio direto, estava complexada como COD, diferentemente do verificado no preparo convencional.

Os resultados obtidos por Salet (1998) e Salet et al. (1999) mostra que, após quase uma década sem calagem, observou-se forte correlação inversa entre atividade do Al^{3+} e o teor de COD apenas na camada de 0 a 5 cm. Na camada de 5 a 15 cm, os autores obtiveram maior porcentagem de espécies de Al tóxico na solução e menores teores de Al-COD entre os tipos de manejo.

2.6.3.2 Programa Visual MinteqA2

O programa Visual Minteq é disponibilizado livremente na Internet e pode ser obtido pelo site www.lwr.kth.se. O Visual MinteqA2 que foi lançado em 1999 é um modelo para cálculo do equilíbrio químico da especiação de metais, equilíbrio de solubilidade por recursos hídricos naturais, etc. É o modelo mais usado no mundo para esses propósitos e é reconhecido pela sua estabilidade. O Visual MinteqA2 tem sido atualizado para incluir novos modelos de adsorção (GUSTAFSSON, (2009).

2.7 A matéria orgânica particulada

O fracionamento granulométrico da matéria orgânica em compartimentos pode auxiliar na avaliação das modificações decorrentes do uso devido à maior sensibilidade dessas frações frente ao manejo (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1992; BAYER et al., 2004; NICOLOSO, 2005). A adoção de tipos de manejo de solo que

promova diferente aporte de biomassa vegetal pode ser identificada por meio da fração particulada da matéria orgânica, sendo possível esta ser usada como ferramenta para avaliar a qualidade do solo, principalmente em um curto período de tempo (CONCEIÇÃO et al., 2005).

O fracionamento granulométrico da matéria orgânica proposto por Cambardella e Elliot (1992) consiste na separação de duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (MOP) e o carbono orgânico associado aos minerais (MOM). O MOP é a fração da matéria orgânica separada por dispersão e peneiramento do solo associada à fração areia (MOP $>53\mu\text{m}$), sendo caracterizado como partículas derivadas de resíduos de plantas e hifas com estrutura celulares reconhecíveis, cuja permanência no solo está condicionada à proteção física desempenhada por agregados (CONCEIÇÃO et al., 2005). A MOM é a fração da matéria orgânica associada às frações silte e argila do solo (MOM $< 53\mu\text{m}$), sendo definida como a fração da matéria orgânica que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, estando protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1992).

O manejo orgânico pode influenciar positivamente os atributos químicos e físicos do solo. Avaliando as propriedades edáficas em áreas sob manejo orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo no Rio de Janeiro, Cardozo et al. (2008) observaram efeito positivo do manejo orgânico nas propriedades físicas e químicas, apresentando maiores valores desses atributos quando comparados à área de floresta secundária, principalmente na camada de 0 a 5 cm.

Loss et al. (2009) avaliaram a MOP de amostras de solo nas camadas de 0 a 5 e de 5 a 10 cm em área de rotação com frutíferas e de lavouras manejadas com plantio direto e preparo convencional e constaram maiores estoques de MOP. Maiores variações foram observadas na profundidade de 0 a 5 cm, na área com plantio direto, tanto no inverno como no verão. A MOP mostrou-se mais eficiente que o C orgânico total evidenciar diferenças entre os sistemas avaliados na camada de 0 a 5 cm. As diferenças observadas entre os sistemas de manejo para o MOM foram atribuídas ao uso constante da adubação orgânica.

2.8 Manejo e rotação de culturas

O conceito de manejo do solo se refere à combinação de todas as operações mecânicas de preparo, incluindo práticas culturais, fertilização, correção do solo e outros tratamentos conduzidos ou aplicados ao solo para a produção das plantas. No presente estudo, entretanto, foi usado o conceito restrito, referindo manejo de solo como as práticas mecânicas de revolvimento, movimentação e condicionamento do solo para a recepção das sementes, controle de plantas daninhas que a literatura em inglês define como “tillage” (SSSA, 2008), que é a manipulação mecânica do perfil do solo para qualquer propósito.

Os tipos de manejo conservacionistas de solo têm sido adotados em larga escala nas principais regiões agrícolas do Brasil. Entre eles, o que mais se destaca é o sistema plantio direto, no qual a semeadura é feita diretamente sobre a palha das culturas anteriores sobrejacentes ao solo, sem prévio revolvimento do solo

(PLATAFORMA..., 2005). Isto favorece a redução de custos de produção e mitiga os efeitos prejudiciais da erosão hídrica do solo. Este modo de manejo do solo promove mudanças significativas das propriedades do solo, em comparação ao preparo do solo com aração e gradagem (BERTOL et al., 2004).

Entretanto, o sistema plantio direto tem apresentado problemas de degradação, na forma de compactação e intervenções tem sido estudadas e sugeridas. Ao estudar os efeitos do sistema plantio direto, com e sem escarificação, Câmara e Klein (2005a) verificaram que o solo escarificado apresentou densidade do solo menor que o não escarificado e maior infiltração de água, condutividade hidráulica do solo saturado e rugosidade superficial, demonstrando que a escarificação pode ser uma técnica eficaz para melhorar a conservação do solo e da água. A escarificação apresentou efeito residual por um ano. A porosidade total e a macroporosidade não foi diferente entre os manejos. Nos dois manejos, a cobertura do solo foi similar antes da semeadura, isto é, após seis meses da escarificação.

Piccinin (2005) relata que a disponibilidade e retenção da água e nutrientes no solo, assim como o desenvolvimento radicular é consequência da distribuição, continuidade e diâmetro dos vazios, tipo, classe e localização das estruturas, e menos dependente dos valores de densidade de solo. Os valores de densidade estão mais associados aos índices de resistência à penetração do solo, o que não afeta, no entanto, o maior ou menor desenvolvimento radicular, relacionado de forma mais direta a vazios de origem estrutural. Não se constatou o desenvolvimento de processos de degradação do solo, mas

foram caracterizadas diferenças na produtividade em função dos sistemas e manejo de solo e de cultivo avaliados.

Contudo, os manejos conservacionistas somente são eficientes se acompanhados de outras práticas agronômicas e produtos tecnológicos que configurem sistemas conservacionistas de manejo de solo (MUZILLI, 1996).

Os manejos conservacionistas podem afetar positivamente os atributos do solo, interferindo por sua vez na distribuição das raízes, com reflexos no crescimento da parte aérea, interagindo conseqüentemente, no rendimento de grãos da espécie em cultivo (DA ROS et al., 1997; FRANCHINI et al., 2000). Para que isso possa ser comprovado, é necessário conduzir experimentos por vários anos, envolvendo espécies tanto de inverno como de verão, em diferentes arranjos de rotação de culturas (DE MARIA et al., 1999; FONTANELI et al., 2000; SANTOS e REIS, 2003). Nesse caso, as espécies podem ser avaliadas isoladamente ou em conjunto. Tem sido observado que existem relativamente poucos trabalhos de longa duração avaliando rendimento de grãos de culturas sob sistemas de manejo de solo. Nos trabalhos mais destacados, elaborados até a metade da década de 1990, não havia análise conjunta dos anos sobre rendimento de grãos de milho, soja, sorgo e trigo, sob diferentes sistemas de manejo de solo (DERPSCH et al., 1983; RUEDELL, 1995). Porém, em trabalhos publicados posteriormente (SANTOS et al., 1995; KLUTHCOUSKI et al., 2000; PAULETTI et al., 2003; PEDERSEN e LAUER, 2003 e, SANTOS et al., 2006b), não foram verificadas diferenças entre os rendimentos de grãos de aveia branca, cevada, milho e soja avaliados nos referidos estudos.

Além disso, são pouco comuns trabalhos envolvendo análise conjunta de sistemas de manejo de solo e rotação de culturas na região Sul do Brasil. Ruedell (1995) e Ciotta et al. (2002) estudaram sistemas de rotação de culturas, porém sem uma análise conjunta dos anos do rendimento de grãos de soja. Santos et al. (1995) e Santos e Reis (2003) também compararam rotações de culturas, em um conjunto de anos, mas não observaram diferenças no rendimento de grãos de soja.

2.8.1 Modelos de rotações de culturas

Considerando somente sistemas de rotação de culturas envolvendo espécies de inverno ou de verão, SANTOS e REIS (2003) em Passo Fundo, observaram maiores rendimentos de grãos em soja cultivada por dois ou três anos consecutivos, quando intercalada a milho. O menor rendimento de grãos desta oleaginosa ocorreu em sucessão soja-trigo. Em outros trabalhos, quando a soja foi cultivada com plantio direto, os rendimentos de grãos foram mais elevados com uma ou duas safras de intervalo de rotação entre cada cultivo de soja (SANTOS et al., 1997; 1998).

A sustentabilidade dos manejos conservacionistas depende da rotação de culturas permanente (PAULETTI et al., 2003). Nesse caso, os resíduos vegetais na superfície do solo podem proporcionar tanto efeitos positivos como negativos sobre o crescimento de plantas de inverno ou de verão estabelecidas em sucessão. No caso de soja cultivada sob determinados resíduos vegetais remanescentes de inverno, em Passo Fundo, RS e Guarapuava, PR, têm sido verificados rendimentos maiores do que sob outros resíduos, por exemplo: colza e

linho (SANTOS e REIS, 2003). Além disso, estatura de plantas, altura de inserção dos primeiros legumes e número de grãos por planta de soja, também podem ser afetadas positiva ou negativamente pelos resíduos vegetais (SANTOS e REIS, 2003; SANTOS et al., 1998).

2.9 Condições climáticas e a produção vegetal

Geralmente, para qualquer cultura, os períodos de semeadura são definidos e as cultivares selecionadas de forma que o ciclo de desenvolvimento possa ser completado sob condições climáticas relativamente favoráveis. Vários fatores interferem nesse processo. Desde as características climáticas locais e, principalmente, até os sistemas de produção agrícola da região. Todavia, devem-se sempre considerar os períodos críticos das culturas em relação ao seu ciclo de desenvolvimento e as possíveis ocorrências de adversidades meteorológicas (TAIZ e ZEIGER, 2006).

O clima e o solo, de acordo com Cunha et al. (1998) são as variáveis que explicam as diferenças regionais dos impactos de deficiência hídrica na cultura de soja no RS. Particularmente, em função da capacidade de armazenamento de água disponível no solo e de regime pluviométrico (CUNHA et al., 2002).

No caso da cultura de soja, a disponibilidade hídrica é uma variável que limita a expressão do potencial de rendimento da cultura de soja no RS, independentemente do ciclo do cultivar, da época de semeadura e do local. Todavia, há variabilidade entre as regiões, existindo aquelas aonde as magnitudes da perda de potencial de rendimento, por falta de água à cultura, são maiores. A variabilidade na distribuição de chuvas, durante o período de primavera-verão, é a

principal limitação à expressão do potencial de rendimento da cultura de soja no sul do Brasil. Frustrações de safras, devido à deficiência hídrica, com a obtenção de rendimentos baixos para a cultura de soja no RS, foram registradas em uma de cada três safras desde fins dos anos 1970 (BERLATO e FONTANA, 1997). Cunha et al. (1998) indicaram que a disponibilidade de água é o principal fator limitante ao rendimento de soja no RS, e que a precipitação natural não atende a demanda potencial de água para essa cultura, em todas as regiões do Estado.

Muitos fatores participam e interagem para determinar o rendimento da cultura da soja, dentre os quais poderiam ser destacados o manejo da cultura. No caso da soja, mesmo nas melhores condições de cultivo é comum ocorrer aborto de flores e de legumes por deficiência hídrica (VENTIMIGLIA et al., 1999).

Em culturas de verão, os valores potenciais de rendimentos de grãos também dependem dos componentes fenológicos determinantes, de acordo com Ventimiglia et al. (1999). Esses componentes fenológicos são governados pela temperatura, umidade do ar e do solo, luminosidade e disponibilidade de água no solo (CALVIÑO e SADRAS, 1999; FLOSS, 2006), fatores climáticos estes que variam muito de um ano para outro.

2.10 As condições edáficas e a produção das culturas

Há uma íntima relação entre os fatores atmosféricos e os relativos ao solo, como a variação da temperatura, a disponibilidade de água, a aeração e a disponibilidade de nutrientes, que depende, em muito do intemperismo das rochas matrizes do solo, processo esse

dependente do clima (OLIVEIRA, 2008). O atual conceito de solo fértil é definido como aquele que oferece a condição indispensável para que o sistema seja produtivo e o conceito de fertilidade do solo inclui todos os fatores necessários para o desenvolvimento das plantas: O₂, H₂O, calor pH, permeabilidade e nutrientes (FLOSS, 2006).

Do ponto de vista agrícola, a distribuição mensal da precipitação pluvial é mais importante que a anual, quanto ao atendimento das exigências específicas de cada cultura em sua respectiva estação de cultivo. A água do solo deve estar disponível em níveis adequados, não somente para as necessidades fisiológicas da planta, como manutenção da turgidez dos tecidos, atua como substrato metabólico da fotossíntese, no transporte de nutrientes e fotossintatos e no controle da temperatura da planta, como também, disponível no solo para o fornecimento de nutrientes minerais dissolvidos na solução do solo e absorvidos mediante processos de difusão e fluxo de massa (LARCHER, 2000; EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Em sistemas de produção agrícolas baseados na oferta de águas de chuvas a nutrição de plantas é dependente de volumes de águas que são fornecidos de modo aleatório, dificultando o planejamento do manejo das culturas, principalmente quando a distribuição de chuvas é muito irregular. Calviño e Sadras (1999) constataram que, em solos com baixa disponibilidade de P da região pampiana argentina, na qual o clima apresenta grande variabilidade na precipitação pluvial anual, a absorção de P, aplicado em diferentes níveis, depende muito mais da disponibilidade de água no solo, do que do nível de P aplicado, principalmente quando o solo apresenta classe

de profundidade efetiva rasa. Neste trabalho, os autores observaram diferenças no rendimento de soja em função da absorção de P, que foi dependente da água disponível no solo. Porém, não basta haver água disponível no solo. Isso deve ocorrer em condições adequadas. Solos cujas condições edáficas favoreçam o acúmulo de pouca água disponível ou de presença de lâmina de água não drenada apresentam grande variação no rendimento, dependendo do excesso ou escassez pluvial do período (KRAVCHENKO e BULLOCK, 2000).

O *status* de fertilidade do solo também influencia o rendimento das culturas, tanto que o melhoramento genético de plantas no Brasil, notadamente, os de soja, milho e trigo, no que diz respeito à adaptação das plantas às condições edáficas, sempre enfocou a tolerância aos níveis tóxicos de Al no solo (BARBOSA et al., 2000; FREITAS et al., 2000; SOUZA, 2001). Muitos solos cultivados com trigo no Rio Grande do Sul são ácidos e de baixa fertilidade, o que limita o rendimento de grãos. Assim, o uso de genótipos de trigo tolerantes ao Al tóxico e, eficientes e responsivos ao aproveitamento de nutrientes (ECHART e CAVALLI-MOLINA, 2001) tornou-se importante na redução do custo de produção e no aumento do rendimento de grãos e na qualidade deste cereal.

O trigo cultivado no Brasil, quando estabelecido em sucessão a outras gramíneas, tem na deficiência do N o fator que mais limita o rendimento de grãos, seguida pela deficiência de P. Contudo, se a sucessão for uma leguminosa, em particular à soja, a deficiência de P e a acidez do solo podem ser os fatores mais limitantes. Genótipos de trigo tolerantes ao Al se mostram responsivos à calagem e à aplicação de P, enquanto que a correção da acidez e a adubação

fosfatada provocam a diminuição no índice de colheita. Os materiais de trigo tolerantes ao Al mostram-se mais eficientes em relação ao aproveitamento do P aplicado e os teores foliares de Al são maiores no genótipo sensível a esse elemento no solo do que nos materiais tolerantes, e diminuem com a aplicação de adubo fosfatado ou de calcário. Os genótipos que apresentam maior tolerância ao Al, em função da menor inibição do crescimento radicular, tendem a mostrar maiores rendimentos (FREITAS et al., 2000).

Os solos agricultáveis do Brasil são, majoritariamente, Latossolos de baixa fertilidade, com elevada acidez e teores de alumínio tóxico às plantas, também elevados, demandando, portanto, no aproveitamento agrícola intensivo, de correções com calcário e com fertilizantes químicos (OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Schlindwein e Gianello (2008), desde a década de 1960, o aumento da produtividade das culturas foi favorecido com pelos resultados obtidos de estudos de calibração realizados no RS. Em lavouras de verão e de inverno, em cerca de cinquenta anos, o rendimento médio das culturas aumentou, no Estado, em 70, 170 e 150% para a soja, trigo e milho, respectivamente (IBGE, 2008). Esses aumentos podem ser atribuídos à utilização de variedades mais produtivas e, ou, a técnicas mais avançadas de produção. Entretanto, a exigência de nutrientes também aumentou com a maior exportação de nutrientes. Com isso, a maior produtividade das culturas está exigindo, além de maiores teores críticos de nutrientes, também a indicação de maiores doses de fertilizantes (SCHLINDWEIN e GIANELLO, 2008).

O P é o nutriente mais limitante para a soja. Ventimiglia et

al. (1999) afirma que a deficiência de P no solo diminui o potencial de rendimento da soja já nos estádios reprodutivos iniciais, como o florescimento, pela menor produção de flores e maior aborto dessas estruturas; o efeito da deficiência de P continua a se manifestar na formação de menor quantidade de legumes e maior aborto de legumes, o que resulta na diminuição do potencial de rendimento e do rendimento real.

2.11 As práticas de manejo e as condições físicas do solo

Os distintos tipos de manejo mecânico do solo e as combinações de culturas alteram a estrutura física do solo, principalmente se comparados ao solo não cultivado. Estas alterações têm sido consideradas mais pronunciadas nos sistemas de preparo do solo por revolvimento do que os denominados conservacionistas, e as alterações são mais facilmente observáveis nos atributos referentes à estruturação do solo, como por exemplo, densidade do solo, classes de porosidade, resistência à penetração, estabilidade de agregados e condutividade hidráulica do solo (BERTOL et al., 2004).

Os preparos de solo mediante revolvimento rompem os agregados na camada revolvida e, ao promover aeração intensa e imediata dessa camada, acelera a decomposição da matéria orgânica, comprometendo as subseqüentes reagregações do solo, bem como desencadeando rearranjos erráticos de reestruturação que irão favorecer o aumento da resistência do solo à penetração (NEVES et al., 2006). Muitos trabalhos de pesquisa mostram que o manejo mecânico do solo, caracterizado pelo preparo mediante revolvimento, promovem aumento no volume de poros no volume da camada

revolvida, aumentando a permeabilidade e a aeração (BERTOL et al., 2000; COSTA et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2004) e favorecem o crescimento das raízes, em comparação aos tipos de manejo sem revolvimento. Entretanto, tais efeitos favoráveis ao crescimento de raízes somente ocorrem dentro da camada revolvida. Abaixo desta, a condição físico-hídrica, normalmente, é o inverso da superficial (COSTA et al., 2003; BERTOL et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2004). As vantagens dos preparos por revolvimento geralmente não compensam o efeito negativo da falta de cobertura por palha na superfície, principalmente em solos sujeitos às chuvas erosivas, gerando intensa erosão hídrica e selamento superficial, com conseqüente redução na infiltração e aumento do escoamento (BERTOL et al., 2001), quando comparados aos tipos de manejo conservacionistas.

Os tipos de manejo de solo considerados conservacionistas, tal qual o plantio direto e o cultivo com escarificador de hastes, mantêm de modo parcial ou totalmente, os resíduos vegetais na superfície, permitindo assim, manutenção contínua de matéria orgânica ao solo, a qual deveria ser condicionadora da manutenção e melhoria de propriedades químicas e físicas do solo (REICHERT et al., 2003).

Nicoloso et al. (2008) observaram que o efeito da escarificação mecânica em solo muito argiloso, nos períodos de elevada precipitação pluvial, foi temporário, não constando melhoria nas condições físicas nove meses após a operação, enquanto que a “escarificação” biológica foi mais persistente. Por outro lado, verificaram que a escarificação biológica aumentou a persistência da

melhoria das condições físicas do solo induzidas pela escarificação mecânica e que os maiores rendimentos de grãos de soja foram observados após a escarificação biológica do solo, isolada ou associada ao uso de escarificador.

2.12 O manejo do solo e a produção das culturas

Os diferentes tipos de manejo do solo propiciam diferenças nas condições edáficas do solo cultivado. Uma das principais diferenças entre o manejo por preparo convencional do solo e o plantio direto é que neste último ocorre concentração superficial e subsuperficial de P, de K, de matéria orgânica e de outros nutrientes, decorrente das adubações e da ciclagem. A amostragem da camada de 0 a 10 cm, com maior concentração em P e K, resulta em maiores valores na análise de solo desses nutrientes, sem que necessariamente implique em aumento de rendimento das culturas. Assim, o teor crítico de P deve ser maior na camada de 0 a 10 cm em solos com plantio direto do que na de 0 a 20 cm, tanto com plantio direto quanto sob preparo convencional de solo por revolvimento (SCHLINDWEIN e ANGHINONI, 2000).

Os diferentes modelos de preparo de solo podem afetar o rendimento de culturas e as características edáficas dos solos, prejudicando o desenvolvimento das plantas. O manejo inadequado como o preparo convencional, com excessivas arações e gradagens, tem sido apontado como um dos responsáveis pela degradação de solo e causa de decréscimo do rendimento das culturas. A formação de camada compactada é consequência da intensidade de revolvimento de solo ou trânsito de máquinas, tipo de equipamento, dos sistemas de

manejo de solo, da presença de resíduos vegetais e das condições hídricas do momento de preparo (STONE e SILVEIRA, 2001).

Para minimizar a degradação do solo e tornar viável o cultivo das espécies, os manejos conservacionistas que demandam de menor revolvimento de solo possível, aliado à manutenção da cobertura com palha, tem sido adotado pelo agricultor gaúcho. Esses manejos, por sua vez, podem afetar positivamente as características químicas, físicas e biológicas do solo com reflexo no rendimento de grãos das espécies (FRANCHINI et al., 2000). Entretanto, RUEDELL (1995), verificou que trigo foi uma espécie com menor resposta ao tipo de manejo de solo. Em trigo cultivado com plantio direto, porém, houve rendimento de grãos mais elevado do que com preparo convencional na maioria dos anos. Complementarmente, a rotação de culturas permite aumentar e estabilizar o rendimento de grãos pela diversificação de espécies (SANTOS et al., 2006b). Estes autores observaram que o trigo cultivado com plantio direto ou com cultivo com escarificador de hastes tem maior rendimento de grãos, maior massa de mil grãos e maior altura de plantas do que trigo cultivado com preparo convencional. Em adição, os menores rendimentos de grãos de grãos, massa de mil grãos e altura de plantas se manifestam na monocultura, em comparação com a rotação de um ou dois invernos de trigo. Observaram também que praticar rotação de culturas com dois invernos sem trigo propicia maior rendimento de grãos e altura de plantas, em relação à monocultura e a um inverno sem trigo.

O sistema plantio direto, por demandar de rotação de culturas, favoreceu a redução de uma série de insetos e

microrganismos fitopatológicos, com efeitos positivos no rendimento das culturas de inverno principalmente. Porém, o esse tipo de manejo produziu condições favoráveis a formação de camada compactada no solo que alterou marcadamente o microclima e a comunidade biológica no agroecossistema, com reflexos na incidência dos agentes causais das doenças do trigo, de acordo com Prestes et al. (2002). Tem sido verificado que em monocultura de trigo índices mais elevados de severidade de podridão-comum, em comparação a um ou mais invernos sem esse cereal. Santos et al. (1995) e Santos et al. (2000) constataram que os menores rendimentos de grãos e os maiores índices de severidade do mal-do-pé e da podridão-comum, ocorreram em monocultura de trigo, sob plantio direto, quando comparados a um inverno, a dois invernos ou a três invernos sem trigo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

Um experimento pertencente ao projeto de pesquisa denominado “Estudo dos efeitos de sistemas de manejo e de rotações de culturas sobre as propriedades químicas e físicas do solo e no rendimento de culturas” foi selecionado para a condução do presente estudo. A escolha deste experimento foi devido aos tratamentos de manejo de solo e de rotações de culturas, e das condições de condução do mesmo se assemelhar àquelas adotadas por considerável parcela de agricultores da região do Planalto Médio do RS (MARTINAZZO, 2006).

O experimento foi instalado no Campo Experimental do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), localizado na BR 285, km 294, município de Passo Fundo - RS, nas seguintes coordenadas: latitude 28°14'08,43”S; longitude 52°24'28,71”W, e altitude: 687m. O solo é um Latossolo Vermelho distrófico húmico (STRECK et al., 2008), de textura argilosa (argila: 532 g kg⁻¹; silte: 192 g kg⁻¹; areia fina: 151 g kg⁻¹ e areia grossa: 125 g kg⁻¹) e de relevo suave-ondulado. A declividade da área varia de 1 a 4 %. A erosão no local do experimento varia de laminar ligeira a moderada.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de subparcelas e três repetições. As parcelas foram constituídas pelos tipos de manejo de solo. A área de cada parcela é 360 m² (4 m x 90 m), e da subparcela (sistemas de rotação de culturas), 40 m² (4 m x 10 m). Os tratamentos avaliados foram os

seguintes: preparo convencional de solo com arado e grade de discos (PC), cultivo mínimo com escarificador (PM) e semeadura direta (PD). Os sistemas de rotação de culturas: rotação R1: trigo/soja (T/S); rotação R2: trigo/soja e ervilhaca/sorgo (T/S/E/Sg); e rotação R3: trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja (T/S/E/Sg/Ab/S).

3.2 Histórico da área experimental

Antes da instalação do experimento, a área encontrava-se sob vegetação de campo natural até a década de 1950. Nas décadas de 1960 e 1970, a área foi usada com lavouras de trigo e soja, manejadas com preparo convencional do solo. Por cinco anos, antes da instalação da Embrapa Trigo (1974), a área foi usada com pastagens de gramíneas nativas e havia alta infestação de ervas daninhas (SANTOS et al., 2006a). Em novembro de 1985, três anos antes da semeadura das culturas de inverno, para instalação do experimento, a camada de solo de 0-20 cm foi amostrada, e os resultados das análises foram: pH em água = 4,8; índice SMP = 5,3; Al trocável = 1,2 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca + Mg trocáveis = 4,9 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H + Al = 9,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; saturação por bases = 35%; matéria orgânica = 34,0 g dm^{-3} ; P = 23,0 mg dm^{-3} e K = 104 mg dm^{-3} (SANTOS et al., 2006a). O solo foi escarificado por meio de equipamento de hastes rígidas (Jumbo[®]) e, posteriormente, submetido à correção de acidez, com 7,0 t ha^{-1} de calcário dolomítico (PRNT 100%), visando a elevar o pH em água a 6,0. O calcário foi aplicado em duas parcelas: metade da dose antes da aração (arado de discos) e metade antecedendo a gradagem (grade niveladora de discos). A adubação foi baseada na média dos valores observados nas análises químicas da área experimental (SIQUEIRA et al., 1987). As

culturas foram adubadas na linha de semeadura e as adubações de cobertura, para o sorgo e os cereais de inverno, foram feitas no estágio fisiológico da cultura e nas doses recomendadas (SIQUEIRA et al., 1987; COMISSÃO..., 1989; COMISSÃO..., 1995; CQFS – RS/SC, 2004).

Em 2007, foram semeadas as seguintes cultivares: trigo - BRS Guamirim; aveia branca - UPF 20; ervilhaca - comum; soja - BRS 255 RR e sorgo - BRS 304. A semeadura das culturas foi feita de acordo com os espaçamentos indicados nas recomendações técnicas ou das comissões de pesquisa, o mesmo ocorrendo com os tratamentos fitossanitários (controle de plantas invasoras, pragas e moléstias), nos quais também foram usados os produtos indicados nas recomendações e indicações técnicas. As culturas de inverno foram semeadas com semeadora-adubadora de disco duplo defasado, marca Semeato SHM 13[®] (com 13 linhas espaçadas em 0,17 m), sendo a mesma usada na semeadura da soja e do sorgo (com 5 linhas espaçadas em 0,45 m).

3.3 Caracterização climática

O clima da região de Passo Fundo, de acordo com Cunha (1997), na classificação de método de Köppen, é do tipo Cfa: temperado úmido variando para subtropical. A precipitação pluvial média anual é de 1.788 mm e a temperatura média anual é de 17,5 °C.

O fornecimento de água para as culturas, no experimento, foi dependente da precipitação pluvial. A distribuição de chuvas na região de Passo Fundo é caracterizada pela ausência de uma estação seca característica, porém, severas estiagens eventuais são comuns, principalmente no verão (CUNHA et al., 1998).

3.4 Caracterização morfológica dos perfis culturais

Antecedendo as amostragens de solo destinadas às análises dos atributos, foram descritos os perfis culturais dos solos submetidos aos diferentes tipos de manejo. Para tanto, foram abertas de 18 minitrincheiras, com dimensões de 1,5 m de comprimento, perpendiculares às linhas de semeadura; 1,0 m de largura e 0,5 m de profundidade, em parcelas previamente selecionadas. As trincheiras, representando os três tipos de manejo do solo, todas em parcelas da rotação R3, foram descritas onze meses após a última mobilização do solo antes da amostragem deste. Foram usadas somente parcelas da rotação R3, pois esta possui maior número de repetições e a descrição de perfis culturais é um procedimento destrutivo.

As descrições das trincheiras seguiram o método de descrição de perfis culturais adaptado por Blancaneaux et al. (1995). A partir destas descrições foram definidas, em cada tipo de manejo de solo, duas camadas homogêneas, comuns em todos os tipos de manejo de solo. A identificação destas camadas caracterizaram dois ambientes edáficos distintos, sendo um na superfície do solo, de 0 a cerca de 6,7 cm, e sem restrições físicas; outro, subsuperficial, na profundidade variando de cerca de 6,8 a 20 cm, e com restrições físicas. Estas espessuras de camadas surgiram de informações anteriores (SPERA et al., 2004; TOMM et al., 2007) que indicavam presença de camadas superficiais (0 a 5 cm) química e fisicamente não restritivas, e subsuperficiais (10 a 15 cm) restritivas.

As camadas superficiais dos três tipos de manejo foram semelhantes morfológicamente, diferindo somente pelo acúmulo de resíduos culturais. As camadas subsuperficiais se diferenciaram. A do

PD tem aspecto maciço, coerente e compactado; a do PM aspecto maciço, é compactada, porém, com cisalhamentos transversais e divididas por sulcos abertos pelas hastes, preenchidos com material de solo na forma de torrões fragmentados e terra muito desagregada; e a camada do PC consistiu de torrões endurecidos, de vários tamanhos envolvidos por material de solo disperso adensado, formando um arranjo compactado com os torrões.

3.5 Coleta das amostras

Para as análises químicas de solo, foram coletadas amostras deformadas de solo, em cada subparcela, conforme procedimentos recomendados em CQFS-RS/SC (2004). Para as análises físicas, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas. Amostras de solo também foram coletadas em um fragmento de floresta subtropical com araucárias em área adjacente ao experimento. Nesta área, o solo foi amostrado com o mesmo número de repetições. Os resultados de análises químicas e físicas do solo da mata foram tomados como referencial do grau de afastamento dos indicadores do estado estrutural do solo, antes dele ser submetido às alterações antrópicas.

Os atributos físicos foram avaliados nas amostras coletadas nas profundidades de 0 a 3,3 cm e de 3,4 a 6,7 cm, na camada superficial; e de 6,8 a 10; 10,1 a 15; 15,1 a 20, na camada subsuperficial. Amostras também foram coletadas nas camadas de 20,1 a 25 cm com objetivo de se verificar possível existência de um ambiente restritivo do tipo pé-de-arado. As espessuras das amostras variaram de acordo com a altura do anel disponível. As amostras

foram retiradas com anéis de aço de dimensões de 48,7 mm de diâmetro e 33 mm de altura ($61,5 \text{ cm}^3$) e de 72,7 mm de diâmetro e 50 mm de altura ($207,6 \text{ cm}^3$) com uso de amostradores do tipo Uhland. Estas amostras foram colocadas em latas e vedadas com tampas.

3.6 Avaliação dos atributos físicos

No laboratório, as amostras foram mantidas em saturação com água até o momento da análise dos atributos físicos (densidade do solo, das porosidades e da resistência à penetração). A determinação da argila dispersa em água (ADA) foi realizada em amostras com estrutura deformada, peneiradas em malha de 2 mm e secas ao ar (TFSA). A análise foi feita no Laboratório de Análises de Solos da Embrapa Trigo, conforme método de Embrapa (1997). Determinou-se a densidade do solo das camadas, de acordo com método do anel volumétrico, descrito em Embrapa (1997).

O teste de Proctor normal com 560 kPa, sem reuso de material, foi realizado seguindo metodologia descrita em Klein (2008). Para esta finalidade, amostras foram compostas com solo das duas camadas avaliadas. O solo foi peneirado em peneira com 4,8 mm de malha. Os resultados de densidade do solo em função da umidade gravimétrica do solo foram ajustados, minimizando a soma dos quadrados dos desvios, obtendo-se uma equação polinomial de 2º grau (KLEIN, 2008). Com os resultados deste teste foi calculada a densidade relativa (DR).

Foram determinadas curvas características de retenção da água no solo nas amostras com estrutura indeformada. As amostras, após saturação, foram submetidas seqüencialmente a diferentes

tensões (1, 3, 6, 10, 100, 300 e 1.500 kPa) mediante uso de funis com placas porosas (de 1 a 10 kPa), câmaras de pressão com placa porosa de Richards (a 100 e 300 kPa). Na tensão de 1.500 kPa utilizou-se o psicrômetro do modelo WP4-T Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICES, 2003), no qual se obteve a umidade do ponto de murcha permanente em amostra de solo sem estrutura preservada.

As curvas características de retenção da água no solo foram obtidas mediante ajuste com a equação de van Genuchten (1980), utilizando o software SWRC (DOURADO NETO et al., 1990), obtendo assim os parâmetros empíricos de ajuste, a , m e n , fixando-se θ_s no valor correspondente à porosidade total.

Durante a avaliação da curva característica, as amostras foram divididas em três partes. Um terço delas foi novamente submetida à tensão 10 kPa, um terço a 300 kPa e o terço restante, a 500 kPa, cujo objetivo foi determinar qual a umidade em que a resistência a penetração se tornava limitante (2 e 3 MPa), para a determinação da resistência à penetração nessas três tensões.

A resistência do solo à penetração foi determinada em laboratório (LAFAS-UPF), utilizando-se um penetrômetro eletrônico de bancada modelo MA-933, marca Marconi. O perfil de resistência foi reconstituído a partir dos valores médios da resistência das amostras. Para o cálculo da média, utilizou-se 100 valores centrais de cada amostra (KLEIN, 2008).

Para a determinação da porosidade total do solo, foram usados os valores da massa seca das amostras retiradas de cada anel. A porosidade foi classificada em função do diâmetro dos poros, que foi obtido a partir da curva característica de água no solo, sendo assim

dividida: denominou-se de macroporos os poros com diâmetro maior que 0,05 mm; de microporos, os com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm; e de criptoporos, os com diâmetro menor que 0,0002 mm (KLEIN, 1998).

Determinou-se a condutividade hidráulica do solo saturado de acordo com método baseado na movimentação de água, em amostras de solo não deformadas, saturadas e acopladas em um permeâmetro de carga constante, descrito em Embrapa (1997). Utilizou-se amostras de 259,5 cm³ ($\varnothing = 73$ mm e h útil = 62 mm) coletadas nas camadas de 0 a 7,5 cm e de 10 a 17,5 cm. As amostras foram acopladas em um suporte e submetidas a fluxo de água com lâmina d'água mantida constante, conforme descrito em Klein, 2008.

A partir da vazão, calculou-se o fluxo (equação a) e pela equação de Darcy-Buckingham (equação b), e efetuou-se o cálculo da condutividade hidráulica.

$$q = \frac{dQ}{A * dt} \quad (a)$$

em que: q = fluxo (mm h⁻¹), dQ é a vazão (mm³), dt é o tempo e A é a seção da superfície da amostra (mm²).

$$q = -K \frac{d\phi}{dz} \quad (b)$$

A água disponível no solo, avaliada pelo método convencional, foi calculada usando, como limites, a capacidade de campo na tensão 6 kPa; e o ponto de murcha permanente, na tensão 1.500 kPa; conforme Klein (2005), pela fórmula:

$$AD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})$$

Em que: AD é a água armazenada disponível para as

plantas ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ_{CC} é o volume de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) na capacidade de campo (6 kPa) e θ_{PMP} é o volume de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (1.500 kPa).

Outra estimativa do cálculo da água disponível foi obtida por meio de método indicado por Tormena et al. (1998), que utilizou, além dos valores de tensão da água da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, os valores de tensão limitantes da resistência do solo à penetração e da porosidade de aeração, obtendo-se estimativas do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Para o cálculo do IHO, foram inseridas linhas de tendência aos dados experimentais das propriedades, em função densidade do solo, sendo que a umidade na capacidade de campo e a porosidade de aeração foram definidas como limitante na parte úmida do intervalo e a umidade no ponto de murcha permanente e da resistência à penetração limitante na parte seca. Nesse procedimento foram considerados como valores de umidade na capacidade de campo e de ponto de murcha permanente, os anteriormente citados. Considerou-se, também, 2 MPa como valor de resistência limite do solo à penetração (SAVAGE et al., 1996) e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade o limite de aeração (ZOU et al., 2000).

3.7 Avaliação dos atributos químicos

Os atributos químicos foram avaliados nas mesmas camadas dos atributos físicos (item 3.6), sendo analisadas no Laboratório de Química do Solo da FAMV-UPF. As análises de solo foram efetuadas conforme Tedesco et al. (1995). Os teores de P e de K disponíveis foram determinados pelo método de Mehlich-I; os teores de Al, Ca e Mg e de Mn foram extraídos com cloreto de potássio (1

mol L⁻¹); o valor do pH em água foi determinado com potenciômetro, em solução aquosa (1:1); e o valor do índice SMP foi obtido em solução tampão SMP. O S disponível foi extraído com o fosfato de cálcio (500 mg L⁻¹); o B disponível com água quente; e o Zn e o Cu disponíveis, com ácido clorídrico (0,1 mol L⁻¹). A matéria orgânica foi obtida via extração com solução sulfocrômica e determinação espectrofotométrica do cromo reduzido.

Os teores de ferro e de alumínio amorfos, das amostras de solo do experimento e da mata, foram extraídos com oxalato ácido de amônio. Esta solução dissolve os óxidos e oxi-hidróxidos amorfos de Fe e Al, os quais são, posteriormente, determinados em espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 1997).

A avaliação da matéria orgânica particulada (MOP) foi efetuada com amostras de TFSA, obtidas nas camadas avaliadas, após serem divididas em duas alíquotas: 20 g e 1 g, conforme método adotado por Cambardella e Elliot (1992). As alíquotas de 20 g foram dispersas com 60 mL de uma solução de hexametáfostato de sódio 1 mol L⁻¹, mediante agitação mecânica, em agitador horizontal, por 16 horas. As amostras dispersas foram passadas em peneira de 0,053 mm, ficando retida na mesma a fração areia e a matéria orgânica particulada (MOP). As frações areia e MOP foram secadas em estufa a 60°C por 72 horas e pesadas em balança eletrônica.

Em seguida, foi analisada a MOS (C orgânico) nas alíquotas de 1 g e nas subalíquotas fracionadas (frações areia + MOP). O teor de C orgânico foi determinado com o método de Walkley-Black (TEDESCO et al., 1995). Os valores de MOP e MOM (matéria orgânica associada aos minerais) foram calculados pelas fórmulas:

$$\text{MOP} = \text{MOS}_a \times (P_a/20) \text{ e,}$$

$$\text{MOM} = \text{MOS} - \text{MOP};$$

em que: MOP é o teor de matéria orgânica particulada do solo (g kg^{-1}) e $\text{MOP} = \text{teor de matéria orgânica na fração areia} + \text{MOP}$ (g kg^{-1}); P_a = peso seco da fração areia + MOP (g) obtida a partir da dispersão de 20 g de solo; MOM = teor de matéria orgânica associada aos minerais da amostra (g kg^{-1}).

3.8 Análise da solução do solo

Para a avaliação da solução do solo, usou-se amostras de solo coletadas nas camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm, em razão das dificuldades de extração da solução e do alto custo destas análises.

A solução do solo foi extraída com o método da pasta saturada. Para o preparo do extrato de saturação, foi usado solo peneirado (2 mm), que foi umedecido, até atingir a umidade relativa à capacidade de campo (6 kPa). Os valores da umidade volumétrica a esta tensão de 6 kPa, variaram com a amostra, situando-se em cerca de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Após saturadas com água deionizada, as amostras permaneceram 24 horas em repouso, a 4°C . Em seguida, foram acondicionadas em tubos de teflon, com capacidade de 500 mL, e a solução foi extraída em centrífuga (Ciatec CT 6000 Tecnal), por 30 min, a 3.200 rpm, equivalendo a uma aceleração de $2.178 \times g$. Após a centrifugação, as amostras foram decantadas e filtradas em membrana filtrante (Sartorius) com diâmetro de poros de $42 \mu\text{m}$, por meio de bomba de vácuo.

Assim que foram obtidas as amostra da solução do solo, procedeu-se imediatamente as leituras de pH, de condutividade

elétrica (condutivímetro Digimed DM3) e potencial redox (potenciômetro Digimed DM20), com eletrodo metálico de Pt (Metrohm). As amostras da solução foram então fracionadas e parte da alíquota (10 mL) foi acidificada a pH 3,0, com HCl ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$), acondicionadas em frascos plásticos de 100 mL e mantidas em congelador.

As análises de K e de Na foram realizadas em fotômetro de chama Micronal, enquanto que as de Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn e Cu em espectrofotômetro de absorção atômica, no Laboratório de Solos da UPF. Os níveis mínimos de detecção de cátions foram: Ca, $0,01 \text{ mg L}^{-1}$; Mg, $0,01 \text{ mg L}^{-1}$; Al, $0,003 \text{ mg L}^{-1}$; Mn, $0,09 \text{ mg L}^{-1}$; Cu, $0,06 \text{ mg L}^{-1}$ e Zn $0,06 \text{ mg L}^{-1}$. Os ânions e o C orgânico dissolvido (COD) foram analisados no Laboratório de Análises de Água da Universidade Federal de Santa Maria, utilizando um Sistema de Cromatografia Iônica, modelo Sykam Chromatography (IC S135), com soluções ultrafiltradas e diluídas em água Milli-Q. O COD foi determinado pelo método de Silva (2001), em amostras filtradas em membrana de celulose com diâmetro de poros de $0,45 \mu\text{m}$ e 1,5 mL de dicromato de potássio 0,1 N, com incubação em estufa por 4 horas, a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, e leitura em espectrofotômetro, no comprimento de onda de 580 nm. Os níveis mínimos de detecção de ânions foram: nitrito, $0,2 \text{ mg L}^{-1}$; nitrato, 1 mg L^{-1} ; sulfato, 2 mg L^{-1} ; cloreto, 1 mg L^{-1} ; fosfato, $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ e fluoreto, $0,1 \text{ mg L}^{-1}$.

3.9 Especiação iônica

A especiação iônica da solução foi efetuada utilizando-se os valores de concentração dos cátions e dos ânions analisados, da

força iônica calculada e do pH medido na solução, com auxílio do programa computacional VisualMinteq ver.2.61 (GUSTAFSSON, 2009).

Com a especiação, estimou-se a distribuição das espécies iônicas livres e das espécies complexadas, obtendo-se a distribuição percentual, concentração e a atividades de cada espécie. As espécies ligadas aos ânions orgânicos foram estimadas com base no teor de COD, utilizando o modelo “Gaussian DOM”, conforme Grimm et al. (1991).

A força iônica das soluções foi calculada mediante equação que correlaciona esta variável com a condutividade elétrica:

$$\log I (M) = 1,159 + 1,09 * \log CE_{25} (dS m^{-1});$$

em que: CE_{25} é a condutividade elétrica corrigida para 25°C, de acordo com Sparks (1995) e Escosteguy (2001).

Após efetuar as estimativas de espécies químicas, foram obtidos os valores da atividade do Al em solução, calculados com auxílio do programa computacional VisualMinteqA2 ver.2.61, a partir da concentração do Al em solução.

3.10 Avaliação da produção vegetal

As safras avaliadas foram as do inverno de 2007 e a do verão de 2007/08. O RG foi avaliado mediante coleta, pouco antes da colheita de plantas, que também foram utilizadas para a determinação da MS. A umidade dos grãos colhidos foi corrigida para 13%. A massa de MS foi amostrada mediante coleta da parte aérea de plantas, em quatro amostras de 0,5 m² por parcela, após secagem, até peso constante, a 65 °C. Esta avaliação foi efetuada no fim da maturação

fisiológica, equivalendo ao que também é referida como resíduo cultural (SARAIVA e TORRES, 1993).

3.11 Delineamento e análise estatística

A análise estatística dos atributos físicos foi efetuada com os resultados de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, criptoporosidade, agregados analisados por via seca, densidade relativa, resistência à penetração do solo, óxidos amorfos de Fe e de Al, argila dispersa em água e condutividade hidráulica do solo saturado. Os valores obtidos com as curvas características de retenção de água, de água disponível, de intervalo hídrico ótimo não foram analisados, pois foram calculados a partir do total de valores de cada tipo de manejo de solo, assim geraram somente um valor para cada um destes tratamentos.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, esquematizado em parcelas subdivididas. Para a análise dos atributos físicos, químicos (solo e solução) e da produção vegetal, o fator tipo de manejo é o componente da parcela principal, enquanto que o fator rotação de culturas foi locado na subparcela. As camadas de solo, definidas pelas avaliações morfológicas dos perfis culturais, foram separadas em dois ambientes edáficos: a camada superficial (0 a 6,7 cm) e a camada subsuperficial (6,8 a 20 cm). Estas camadas foram comparadas com teste t pareado.

As médias dos tratamentos foram comparadas com o teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade de erro. As camadas não superficiais e subsuperficiais foram comparadas com teste t pareado (SNEDECOR e COCHRAN, 1982).

Os valores dos atributos físicos e químicos (solo e solução) e do RG e MS foram correlacionados, com o modelo de Pearson e o significado dos coeficientes de correlação foi definido, de acordo com Salkind (2005), como variando de muito fortes a muito fracos.

Os resultados das análises estatísticas dos dados foram obtidos mediante programa estatístico CoStat6.400Win, versão Free for Trial (COHORT SOFTWARES, 2009).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos físico-hídricos

Os resultados das avaliações dos atributos físicos, em função dos tipos de manejo de solo e das rotações de culturas, foram discutidos e apresentados a seguir.

4.1.1 Densidade do solo

A análise de variância (ANAVA) dos resultados de densidade do solo não mostrou interação entre os fatores manejo do solo e rotação de culturas, nem efeitos isolados dos dois fatores, tanto na camada superficial (0 a 6,7 cm), como na 6,8 a 20 cm (Apêndice A). Na mata, os valores de densidade do solo foram menores e o mais baixo valor foi observado na camada de 0 a 6,7 cm.

Embora o manejo do solo e as rotações de culturas não influenciaram os valores de densidade do solo dentro das camadas, quando se comparou as duas camadas, foram encontradas diferenças (Tabela 1) entre as camadas. Os maiores valores de densidade do solo foram encontrados na camada 6,8 a 20 cm, indicando que a camada compactada não foi completamente desfeita pelas hastes do escarificador, nem pela aração e gradagem.

De acordo com Koakoski et al. (2007), a escarificação é mais eficiente no rompimento de camadas compactadas quando o solo está seco. Cunha et al. (2009) também constataram, assim como no presente estudo, que o revolvimento ou a escarificação do solo não reduz a densidade, em comparação ao solo sem revolvimento.

Tabela 1. Valores médios de densidade de solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|---------------------|---------|---------------------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Mg m ⁻³ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 1,20 ⁽¹⁾ | 8,2 | 1,36 ⁽¹⁾ | 2,2 | 6,16* |
| Mata | 0,95 | 12,5 | 1,10 | 3,5 | 2,86 ^{ns} |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; *houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

A camada de menor densidade (0 a 6,7 cm) foi alterada pela ação dos discos ou dos facões de corte das semeadoras durante a operação de semeadura, uma vez que, de acordo com Reis et al. (2004), estas ferramentas operam até as profundidades de 6 a 10 cm. Assim, menor densidade do solo em superfície é resultado do maior aporte de resíduos vegetais, e também, da ação dos mecanismos de abertura do solo das semeadoras.

4.1.2 Porosidade do solo

Os resultados de valores de porosidade total, macroporosidade, microporosidade e criptoporosidade também indicaram que não houve interação, nem efeito isolado dos fatores manejo de solo e de rotação de culturas, em ambas as camadas avaliadas, sobre estes atributos (Apêndice A). Por outro lado, os valores de porosidade total, macroporosidade variaram com a camada analisada, enquanto que isto não foi verificado com a microporosidade e criptoporosidade (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios de porosidade total (PT), macroporosidade (MAP), microporosidade (MIP) e criptoporosidade (CRIP) de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--|----------------------|---------|----------------------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Porosidade total, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 0,549 ⁽¹⁾ | 6,7 | 0,488 ⁽¹⁾ | 2,3 | 6,15* |
| Mata | 0,645 | 5,7 | 0,587 | 5,3 | 2,80* |
| Macroporosidade, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 0,146 ⁽¹⁾ | 16,6 | 0,097 ⁽¹⁾ | 9,0 | 6,16* |
| Mata | 0,275 | 19,7 | 0,199 | 23,2 | 1,85* |
| Microporosidade, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 0,165 ⁽¹⁾ | 9,5 | 0,155 ⁽¹⁾ | 12,2 | 0,11 ^{ns} |
| Mata | 0,161 | 13,3 | 0,188 | 16,1 | 1,61 ^{ns} |
| Criptoporosidade, m ³ m ⁻³ | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 0,233 ⁽¹⁾ | 8,1 | 0,235 ⁽¹⁾ | 2,2 | 0,82 ^{ns} |
| Mata | 0,209 | 8,3 | 0,203 | 9,9 | 1,49 ^{ns} |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; *houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os volumes de porosidade total e de macroporos foram maiores na camada de 0 a 6,7 cm em todos os tratamentos. Também foram maiores nas duas camadas da mata, em comparação aos tratamentos.

Os resultados de volume de criptoporos concordaram com as observações de Kertzman (1996), de que os poros de diâmetro menor que 0,0002 mm, denominados no presente trabalho de criptoporos (SILVA, 2003; KLEIN, 2008), são intra-agregados, às vezes sem comunicação direta com o sistema de poros (SILVA et al., 2005), e que não são desfeitos pelo revolvimento (SILVA e CABEDA, 2006).

Não foram encontrados coeficientes fortes de correlação de Pearson entre os valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e criptoporosidade.

Como o volume de criptoporos não acompanhou o aumento da densidade do solo, observado com a maior profundidade da camada analisada (Tabela 1) e, portanto, do volume de sólidos, a estrutura intra-agregados foi pouco alterada. Isto indica que as alterações do volume de micro e macroporos ocorreram entre os agregados e seriam resultantes do rearranjo destes, de forma distinta da original, em decorrência de operações de manejo e preparo do solo (VIANA et al., 2004) e da atividade biológica na camada superficial (SIX et al., 2002).

O menor volume de macroporos e da porosidade total, verificado na camada de 6,8 a 20 cm acompanhou o aumento da densidade do solo observado nesta camada.

O maior volume de macroporos na camada 0 a 6,7 cm indicou, entretanto, que os tipos manejo adotados nas parcelas não favoreceram a redução na compactação do solo na camada superficial, tomando-se os valores originais da mata como referencia. Camargo e Aleoni (1997) relatam que, no processo de compactação, ocorre a transformação de macroporos em microporos, e, isto ocorreu no presente trabalho com mais intensidade na camada de 6,8 a 20 cm. Kaiser e Guggenberger (2003), atribuem o aumento de poros oclusos, em solos com elevado conteúdo de matéria orgânica, à obstrução das cavidades dos poros de dimensões menores que 2 nm com partículas de matéria orgânica. A oclusão destes microporos resulta, segundo os autores, em aumento da retenção de água. Entretanto, os criptoporos

não foram diferentes entre as camadas. Os valores de porosidade total, macroporosidade, microporosidade e critoporosidade da mata também não diferiram entre as camadas. Nos tratamentos, a macroporosidade da camada 6,8 a 20 cm foi, em relação à mata, reduzida, indicando, portanto, processo de compactação nesta camada.

4.1.3 Resistência do solo à penetração

Com o solo úmido (tensão 10 kPa), na camada de 0 a 6,7 cm (Tabela 3), o valor de resistência à penetração (RP) não variou com o tipo de manejo ou de rotação, nem com a interação destes fatores (Apêndice A), independente da densidade do solo. Com o solo seco (300 e 500 kPa), na camada de 6,8 a 20 cm, obteve-se maior valor de PR no PD, em comparação aos demais tipos de manejo (na tensão 300 kPa), e ao PC (na tensão 500 kPa) (Tabela 4).

Tabela 3. Valores médios de resistência à penetração na tensão de 10 kPa de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|---------------------|---------|---------------------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Tensão a 10 kPa, MPa | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 1,41 ⁽¹⁾ | 5,0 | 2,07 ⁽¹⁾ | 4,7 | 6,41* |
| Mata | 0,92 | 15,3 | 1,05 | 4,9 | 0,82 ^{ns} |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; *houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Ainda que não tenha sido possível comparar os valores de RP do solo de mata com os dos tratamentos, observou menores valores de RP nos solos de mata em relação aos solos com uso

agrícola.

Tabela 4. Valores médios de resistência à penetração nas tensões de 300 kPa e 500 kPa de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|-----------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Tensão a 300 kPa, MPa | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 2,83c | 7,8 | 6,39a | 6,2 | 20,96* |
| PC | 3,15b | 5,9 | 3,98b | 6,0 | 1,47 ^{ns} |
| PM | 3,50a | 5,2 | 4,00b | 5,9 | 0,98 ^{ns} |
| Rotações ⁽²⁾ | 3,16 | 4,4 | 4,79 | 12,6 | 4,45* |
| Mata | 1,29 | 10,0 | 1,83 | 11,6 | 3,54* |
| | Tensão a 500 kPa, MPa | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 4,50c | 12,5 | 13,45a | 12,4 | 15,03* |
| PC | 9,53a | 11,1 | 8,74b | 8,4 | 1,42 ^{ns} |
| PM | 5,44b | 15,1 | 13,33a | 11,8 | 15,11* |
| Rotações ⁽²⁾ | 6,49 | 7,0 | 11,84 | 14,0 | 5,89* |
| Mata | 2,52 | 15,2 | 3,62 | 11,8 | 1,28 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Isto também foi observado, principalmente, quando a comparação foi feita com os solos secos (300 kPa) ou muito secos (500 kPa). Na camada 6,8 a 20 cm ocorreu, na tensão 500 kPa, um aumento no valor de RP. Esse aumento estaria relacionado ao menor teor de matéria orgânica do solo nesta camada, em relação à camada de 0 a 6,7cm, verificada no presente estudo (item 4.2), que favoreceu maior RP no solo seco, conforme foi também observado por Fidalski e Tormena (2007).

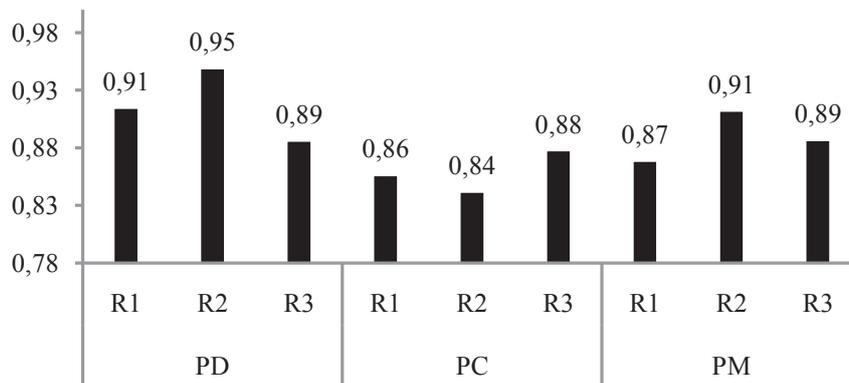
Os atributos físicos avaliados no presente estudo comprovaram estão relacionados às condições edáficas que influenciam o adequado enraizamento, sendo importantes indicadores de capacidade do solo em ofertar ar e água às plantas cultivadas (BRONICK e LAL, 2005). O aumento da RP do solo, observado em todas as condições de umidade avaliadas, foi uma das restrições verificadas na camada de 6,8 a 20 cm dos manejos conservacionistas PD e PM, e em menor grau, no PC. A maior RP no PD é resultante do não rompimento da camada de 6,8 a 20 cm (CUNHA et al., 2009).

4.1.4 Densidade relativa

Na camada de 6,8 a 20 cm (Figura 1), a densidade relativa (DR) variou com a interação entre os fatores estudados e, na camada de 0 a 6,7 cm, houve diferenças somente entre os tipos de manejo (Apêndice A). Os valores da DR da camada de 0 a 6,7 cm foram menores que o da camada de 6,8 a 20 cm (Tabela 5). Os valores de DR, da camada de 0 a 6,7 cm do PC foi o mais elevado, enquanto que nos manejos conservacionistas os valores, foram menores. Isto é consequência da maior quantidade de resíduos vegetais ou do maior teor de matéria orgânica do PD e PM, o que favoreceu menores valores de DR, conforme Tormena et al. (1998).

Na camada de 6,8 a 20 cm, onde os teores de matéria orgânica foram menores, a interação entre os tipos de manejo e de rotação mostram que os valores de DR na rotação trigo/soja e ervilhaca/sorgo (R2) foi maior, nos tipos de manejo conservacionista (Figura 1). Na camada de 0 a 6,7 cm, não foi verificada interação entre os fatores manejo e rotação.

Densidade relativa



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja. As médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey. CV = 2,3%.

Figura 1. Valores de densidade relativa (DR) da camada de 6,8 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Em trabalho que avaliaram os efeitos da compactação do solo, Beutler et al. (2005) consideravam que a DR ideal para o desenvolvimento de culturas em Latossolos Vermelhos, com teor de argila entre 270 e 570 g kg⁻¹, como é o caso do solo do presente trabalho, é de 0,80.

Tabela 5. Valores médios de densidade relativa de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|--------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Densidade relativa | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 0,79b | 7,9 | 0,88 | 3,4 | 5,05* |
| PC | 0,85a | 6,3 | 0,89 | 3,7 | 0,39 ^{ns} |
| PM | 0,80ab | 9,3 | 0,89 | 4,8 | 4,38* |
| Rotações ⁽²⁾ | 0,81 | 7,9 | 0,89 | 2,3 | 4,57* |
| Mata | 0,66 | 10,3 | 0,75 | 10,0 | 2,27 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Entretanto, Marcolin (2006) indica que a DR ideal média dos solos agrícolas do Rio Grande do Sul é de 0,86, para solos com teor de argila entre 350 e 770 g kg⁻¹, sendo que em ambos os estudos, foi avaliada somente a camada de 0 a 20 cm, sendo estes valores de DR menores que os encontrados na camada de 6,8 a 20 cm.

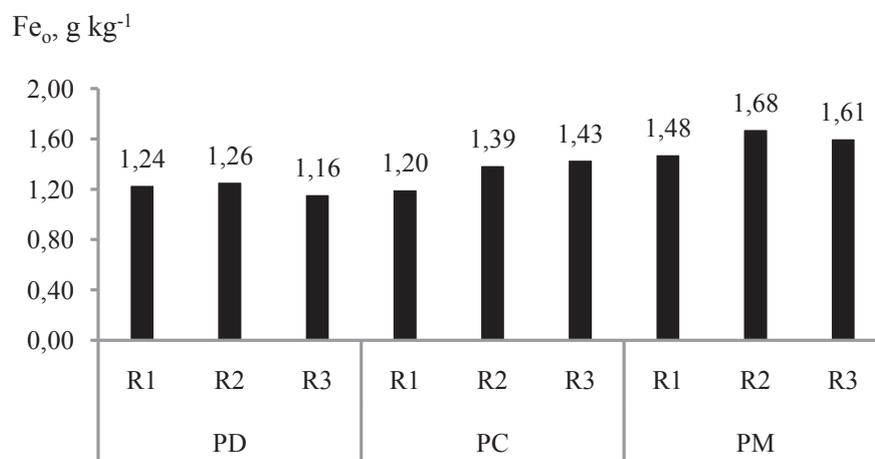
4.1.5 Agentes de cimentação e agregantes

4.1.5.1 Óxidos amorfos de ferro e alumínio

Em razão de valores muito elevados de resistência à penetração, observados na camada 6,8 a 20 cm, principalmente, do PD e do PM, a possibilidade de haver algum processo de cimentação mineralógica foi investigada.

Na camada de 6,8 a 20 cm, os resultados de Fe_o variaram com a interação dos fatores estudados (Figura 2). Os maiores valores de Fe_o ocorreram nos solos com os tratamentos que incluíram o

revolvimento ou a escarificação, em rotações com maior aporte de matéria orgânica (R2 e R3, ambas no PC e no PM). Isto pode ser explicado pela desorganização dos agregados, em razão da perda de matéria orgânica, o que pode ter levado redução de óxidos de Fe, associados à matéria orgânica, conforme Kaiser e Guggenberger (2003).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja. As médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey. CV = 6,7%.

Figura 2. Valores de Fe extraído pelo oxalato de amônio (Fe_o) da camada de 6,8 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

A ANAVA dos resultados de Fe extraído pelo oxalato de amônio (Fe_o) desta camada também mostrou diferenças nos teores entre os tipos de manejo e de rotação. O valor médio do PC foi maior

que o do PD e o da rotação R3, maior que as demais. Os valores de Fe_0 do solo da mata foram maiores ou iguais aos dos solos sob uso agrícola, embora não tenha sido feitas comparações estatísticas.

Os teores de Fe_0 não variaram entre as camadas, independente do tratamento, e nem na mata (Tabela 6).

Tabela 6. Valores médios de ferro extraído pelo oxalato de amônio de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|---|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Fe extraído com oxalato de amônio, g kg ⁻¹ | | | | |
| PD | 1,18 | 6,2 | 1,22b | 5,4 | 1,77 ^{ns} |
| PC | 1,40 | 13,3 | 1,34ab | 17,5 | 0,37 ^{ns} |
| PM | 1,49 | 14,1 | 1,59a | 7,7 | 0,94 ^{ns} |
| R1 | 1,45 | 15,9 | 1,33b | 14,4 | 1,44 ^{ns} |
| R2 | 1,30 | 15,7 | 1,32b | 17,1 | 0,16 ^{ns} |
| R3 | 1,31 | 14,1 | 1,50a | 14,4 | 2,14 ^{ns} |
| Mata | 1,60 | 23,2 | 1,60 | 20,1 | 0,46 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

De acordo com os resultados da ANAVA (Apêndice A), não houve diferenças entre os valores de alumínio extraído pelo oxalato de amônio (Al_0) em todos os tratamentos avaliados (Tabela 7).

Nos solos do Rio Grande do Sul, há predomínio de caulinita, o que implica em desenvolvimento de uma macroestrutura do tipo de bloco, e pode originar solos com densidade mais elevada, maior proporção de poros pequenos e menor permeabilidade, em

razão do ajuste face a face das placas dos minerais da fração argila (FERREIRA et al., 1999).

Tabela 7. Valores médios de alumínio extraído pelo oxalato de amônio de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|---|---------|---------------------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Al extraído com oxalato de amônio, g kg ⁻¹ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 2,16 ⁽¹⁾ | 7,9 | 2,23 ⁽¹⁾ | 8,4 | 0,21 ^{ns} |
| Mata | 1,80 | 11,1 | 1,51 | 11,5 | 7,07* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; *houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

A ausência e a pouca expressão de óxidos de Al e de Fe e de matéria orgânica, nesta ordem, podem favorecer a acomodação ordenada das placas de caulinita em escala microscópica, ao passo que o maior teor daqueles constituintes corresponde a um maior grau de desorganização e menor coesão (RESENDE et al., 2002).

Constatou-se, também que o somatório dos valores obtidos para estes óxidos (Fe_o e Al_o) não atingiram os níveis mínimos considerados, por Araújo Filho (2004), como sendo de 7,0 g kg⁻¹, para haver cimentação fraca e maiores que 12,0 g kg⁻¹, para ocorrer cimentação forte, no processo de consolidação de uma camada compactada.

Os teores de Al_o em solos não cimentados situam-se ao redor de 2,0 g kg⁻¹ (ARAÚJO FILHO, 2004), valores estes que estão inseridos na mesma faixa dos valores encontrados, no presente trabalho, para os solos com e sem uso agrícola. Assim, os teores de

Fe_o e Al_o encontrados no presente estudo não puderam ser considerados como cimentantes das camadas compactadas.

4.1.5.2 Argila dispersa em água

Os teores de argila dispersa em água (ADA) obtido nas camadas de solo em função dos tipos de manejos e das rotações de culturas avaliadas no presente estudo estão mostrados na Tabela 8. Os resultados da ANAVA indicaram que este atributo não variou com a interação entre os tipos de manejo de solo e de camadas avaliadas, nem com o efeito isolado destes fatores (Apêndice A).

Tabela 8. Valores médios de argila dispersa em água (ADA) de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| ADA, g kg ⁻¹ | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 141 ⁽¹⁾ | 11,5 | 168 ⁽¹⁾ | 3,4 | 3,41* |
| Mata | 111 | 4,5 | 95 | 5,3 | 6,58* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; *houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Constatou-se, assim, que os maiores valores de ADA ocorreram na camada de 6,8 a 20 cm, ou seja, a camada compactada. Na condição estrutural original (mata), o maior valor médio ocorreu na camada superficial, havendo um aumento e inversão da distribuição do teor de argila dispersa dos solos com uso agrícola, em relação ao solo na condição original. Vários fatores poderiam estar contribuindo para estas alterações, incluindo a iluviação da argila que foi dispersa

na camada superficial por agentes químicos como o calcário (JUCKSCH et al., 1986; SPERA et al., 2008), mesmo que a aplicação deste tenha ocorrido há muito tempo e os fertilizantes salinos (AZEVEDO e BONUMÁ, 2004; PERNES-DEBUYSER e TESSIER, 2004).

De acordo com Azevedo e Bonumá (2004), os teores de ADA geralmente variam com as alterações causadas pelo manejo do solo e podem contribuir com a formação de camadas compactadas (CARVALHO et al., 1998). As mudanças freqüentemente observadas nos teores de ADA ocorrem nas camadas subsuperficiais e podem ser resultantes da ação de insumos com características dispersantes (SPERA et al., 2008), ou como consequência do revolvimento constante do solo, causando desagregação de agregados primários e secundários (PERNES-DEBUYSER e TESSIER, 2004). Jucksch (1986) e Spera et al. (2008), também relatam que a calagem superficial no PD pode contribuir para a formação de camada compactada.

Embora o solo tenha sido corrigido há 22 anos, a pretérita dispersão ainda pode estar influenciando os teores de ADA, mesmo porque os solos receberam, por muitos anos, insumos com poder dispersante, como os fertilizantes sintéticos de índice salino elevado (PERNES-DEBUYSER e TESSIER, 2004).

4.1.6 Curvas de retenção da água no solo

As curvas de retenção de água do solo obtidas nos diferentes tipos de manejo de solo e na mata, nas camadas estudadas, estão ilustradas nas Figuras 7 e 8 e os parâmetros empíricos de ajuste

dos pontos experimentais à equação de van Genuchten (1980), no Apêndice C.

Foi constatado que o tipo de manejo do solo alterou, em relação aos da mata, as curvas de retenção de água. Isso foi consequência na redução na porosidade e de modificações na distribuição das classes de diâmetro dos poros. Estas alterações foram mais acentuadas no PC, onde se verificou menor inclinação das curvas obtidas nas duas camadas (Figura 3b).

As alterações na densidade e na porosidade do solo promoveram menor teor de água retido no solo, na condição de saturação, e maior teor no ponto de murcha permanente (PMP), em relação ao solo da mata. Entretanto, nos tipos de manejo, não houve diferenças na umidade do PMP, que está representada nos últimos pontos das curvas dos gráficos (Figuras 3a, 3b e 4a).

Os maiores valores de água retida nas tensões mais baixas podem, porém, ter pouca interferência na disponibilidade de água às plantas, pois maiores valores de umidade próximos a saturação representam água facilmente perdida por percolação ou por evapotranspiração. Maiores valores de retenção de água no PMP indicam menor disponibilidade (KLEIN, 2008).

Observou-se que as curvas características dos tipos de manejo avaliados mostraram um rápido declínio da umidade, quando foram aplicadas baixas tensões e variaram muito pouco com a aplicação de tensões acima de 10 kPa. Nas camadas de 0 a 6,7 cm, observou-se que na condição de solo saturado, a umidade foi maior na mata em cerca de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que na tensão de 10 kPa a umidade é maior nos tipos de manejo conservacionistas. Isto indicou

que as alterações na porosidade provocadas pelo aumento da densidade foram mais acentuadas na porosidade relacionada ao movimento rápido da água no solo, do que em relação à retenção de água. Esta nos tratamentos com manejo mecânico aumentou, conforme já havia observado Klein (1998), em Latossolo Vermelho distroférico de São Paulo, manejado com manejo conservacionista.

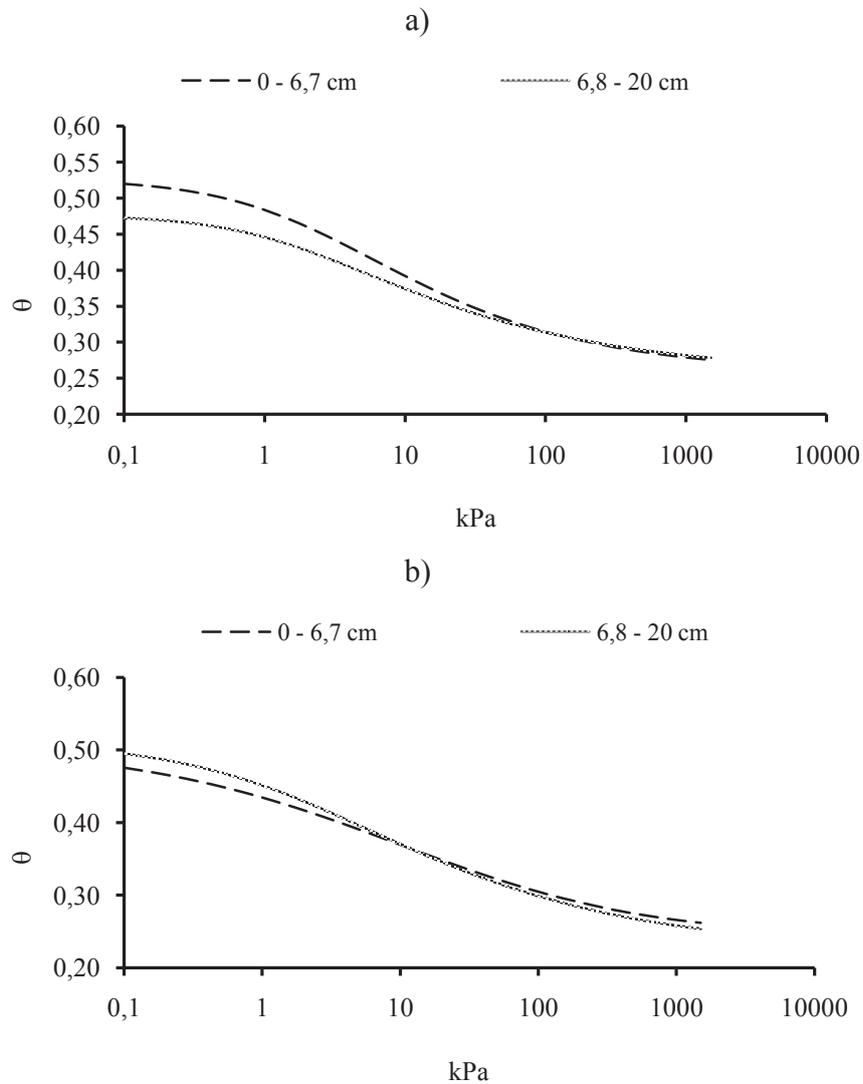


Figura 3. Curvas características de retenção de água de duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico manejado com plantio direto (a) e com preparo convencional (b). Médias das rotações.

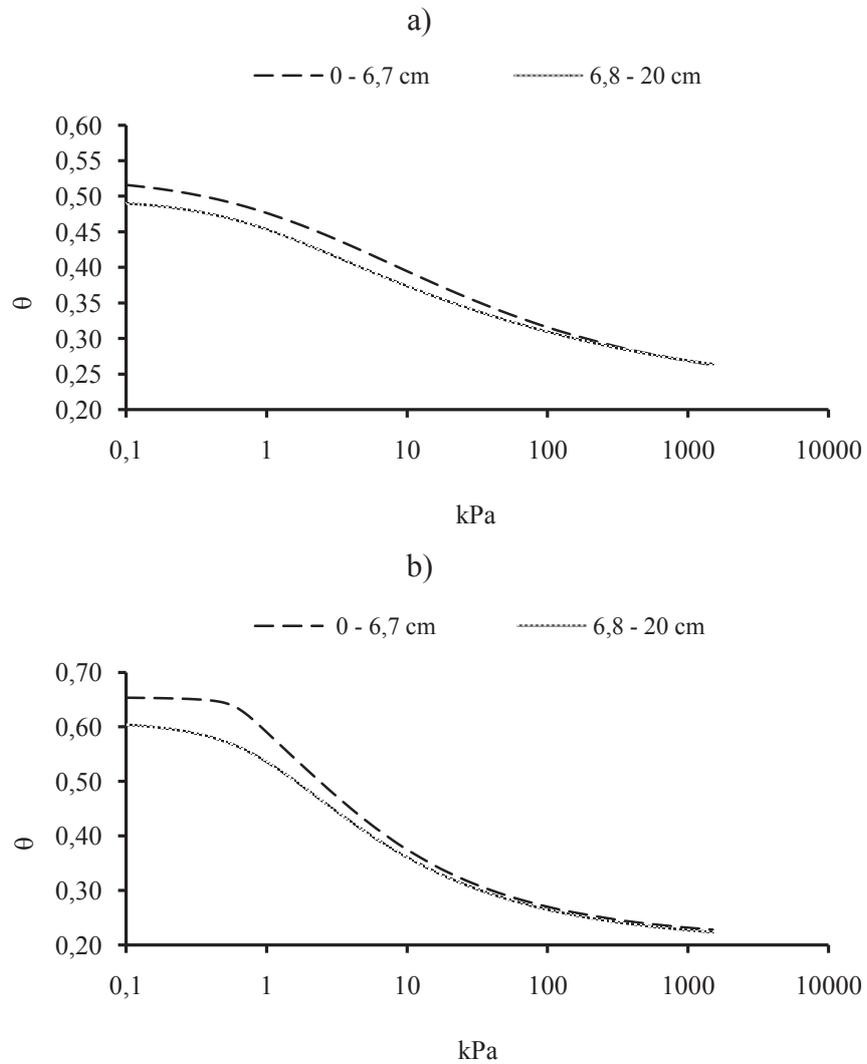


Figura 4. Curvas características de retenção de água de duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico manejado com preparo mínimo com escarificador (a); e de mata (b). Médias das rotações.

4.1.7 Água disponível no solo

A Figura 5 ilustra o perfil de água disponível às plantas, calculado com o método tradicional (Klein, 2005). Foram obtidas, na camada de 0 a 6,7 cm, as quantidades de 4,3 L m⁻², no PD; 3,6 L m⁻², no PC; 4,4 L m⁻², no PM; e 7,7 L m⁻² na mata. Na camada de 6,8 a 20 cm, os valores estimados foram: 5,1 L m⁻², no PD; 6,0 L m⁻², no PC; 5,9 L m⁻², no PM; e 9,8 L m⁻² na mata. Na camada de 0 a 20 cm, os valores totalizaram 9,8; 9,6; 10,3 e 17,5 L m⁻² respectivamente, no PD, PC, PM e na mata. Na camada de 0 a 6,7 cm, foram, então, obtidos baixos conteúdos de água disponível às plantas, sendo estes limitantes ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas. De acordo com Carlesso e Zimmermann (2005), os valores adequados para a classe de textura do solo estudado seria no mínimo 5,5 L m⁻², na camada 0 a 6,7 cm; e 12,0 L m⁻², na camada de 0 a 20 cm. Portanto, a quantidade de água disponível às plantas foi menor que o do solo de mata e menor do considerado adequado. Isto pode explicar, em parte, os baixos rendimentos de grãos das culturas, observados no presente trabalho (item 4.3).

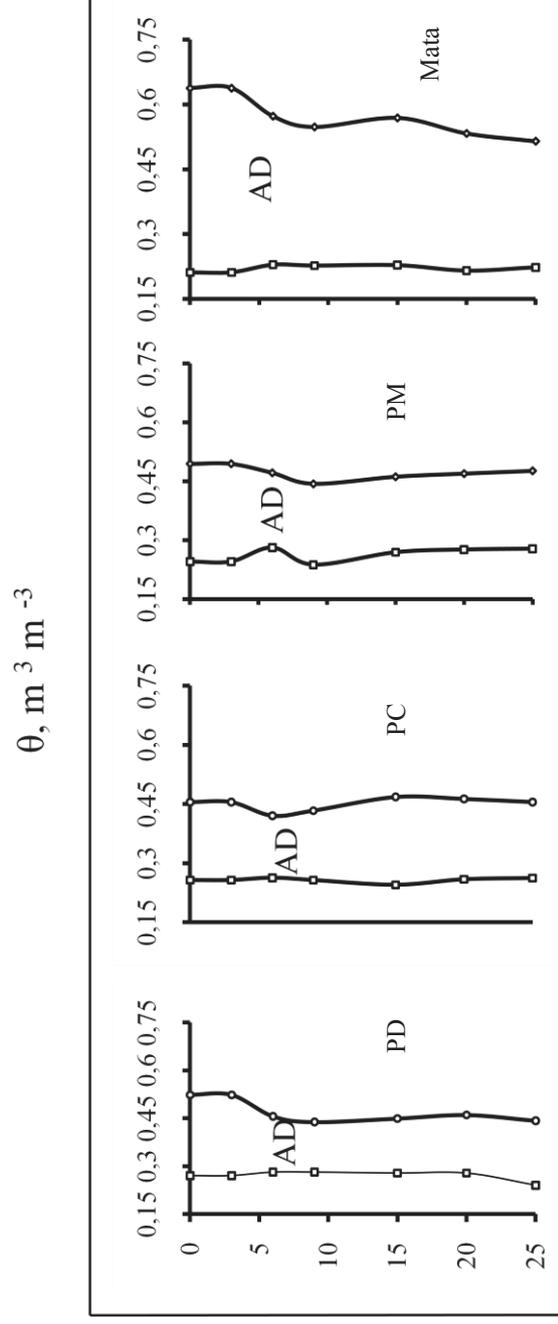


Figura 5. Perfis de distribuição de água disponível no solo, na profundidade de 0 a 25 cm, de um Latossolo Vermelho distrófico, em função dos tipos de manejos de solo.

4.1.8 Intervalo Hídrico Ótimo

Considerando que uma parte da água retida entre a capacidade de campo (CC) e o PMP estaria disponível às plantas, um novo conceito de faixa de umidade do solo não limitante foi introduzido na década de 1980, sendo que no Brasil foi denominado, por Tormena et al. (1998), como intervalo hídrico ótimo (IHO).

No presente estudo, foi avaliado o IHO dos três tipos de manejo de solo e da mata, nas profundidades de 0 a 25 cm. O valor do IHO variou com a profundidade do solo, sendo menores nas camadas de 6,8 a 20 cm, descritas como compactadas. No PD (Figura 6), o IHO atingiu valor nulo, quando a densidade do solo da camada avaliada foi maior que $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$, valor que coincidiu com o de maior densidade observada para este tipo de manejo de solo (Tabela 1). Lima et al. (2009) também verificaram valores muito baixos para o IHO nestas camadas.

No PC, os valores de IHO foram maiores que no PD (Figura 6), sendo limitante na densidade do solo de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, valor esse maior que as médias de densidade das duas camadas estudadas (Tabela 1). Os valores de densidade do solo dos tratamentos, correspondentes aos limites do IHO foram menores que os considerados críticos para a cultura da soja, por Beutler et al. (2006).

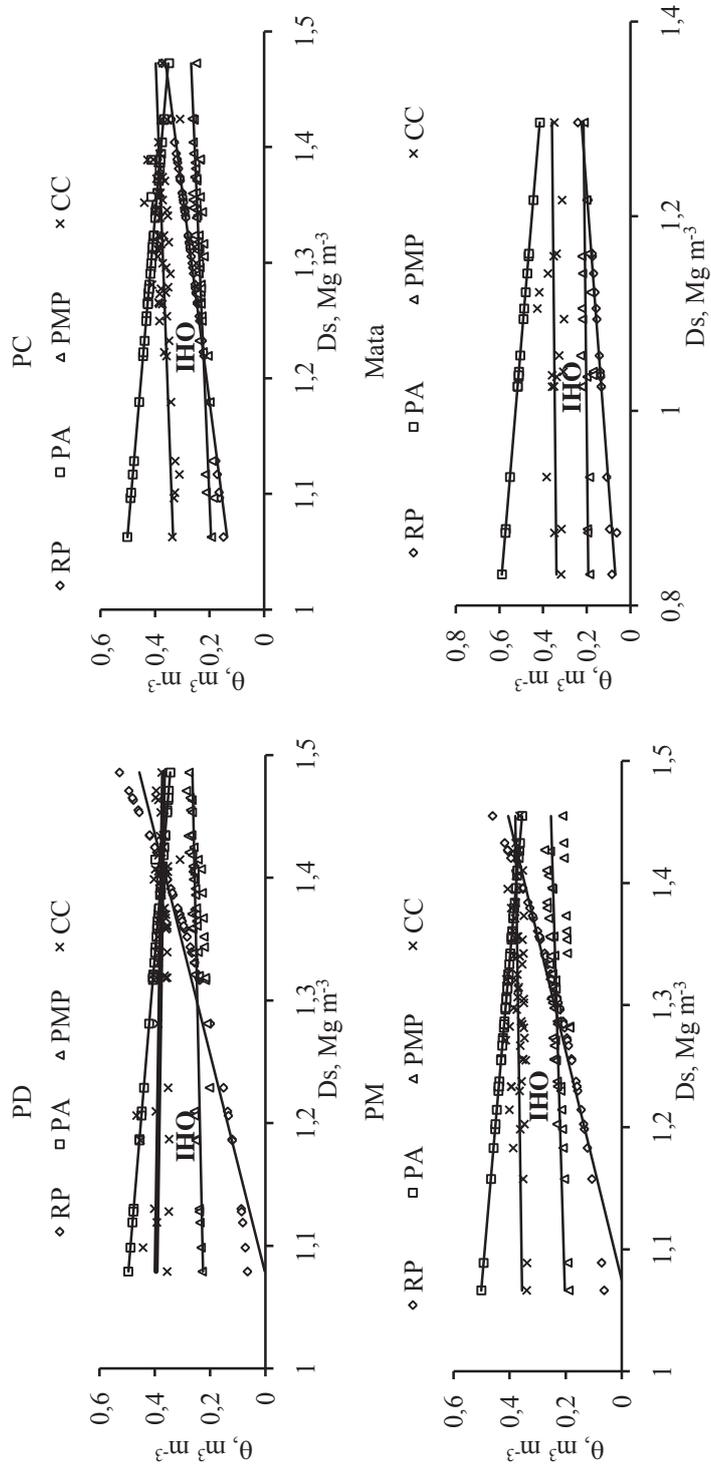


Figura 6. Representação gráfica do IHO de um Latossolo Vermelho distrófico, em função dos tipos de manejos de solo.

No PM, os valores de IHO foram melhores que os do PD. No PM não foi constatada camada compactada tão restritiva quanto à do PD, uma vez a camada foi cisalhada pela ação das hastes do escarificador.

O IHO não foi determinado nos tratamentos com rotações de culturas, ainda que estas pudessem ter influenciado este intervalo, conforme observou Nicoloso et al. (2008). Esses autores constataram que a “escarificação” biológica pode ser eficiente em aumentar a macroporosidade do solo e diminuir a resistência do solo à penetração, alterando atributos que são importantes na definição do IHO. A mata não teve restrições de IHO (Figura 6), pois as condições físicas do solo não foram restritivas (Tabelas 1 a 4), além de mostrar estruturação preservada e elevada capacidade de retenção de água (Figura 5).

A disponibilidade de água pode ser avaliada por meio da representação do IHO, em função da profundidade, definida pelos valores de densidade do solo. O perfil de distribuição de água disponível foi recalculado com base no método do IHO (Figura 7). Comparando os valores da Figura 6, cujos perfis de distribuição de água disponível foram calculados pelo método tradicional, que considera apenas a umidade do solo na CC e no PMP, pôde-se observar que houve sensível redução na quantidade disponível em razão das restrições impostas pela estimativa de porosidade de aeração e pelos efeitos da resistência à penetração do solo, conforme observaram Beutler et al. (2006), Klein et al. (2006) e Klein e Câmara (2007).

No PD, ocorreu na profundidade de 10 a 15 cm valor nulo

do IHO (Figura 7), em decorrência das condições desfavoráveis ao desenvolvimento de raízes das culturas, conforme comentado em Beutler et al. (2006) e Klein (2008). O valor nulo de IHO coincidiu com o maior valor de densidade do solo (Tabela 1), com a redução da macroporosidade e com o aumento do volume de criptoporos (Tabela 2). O IHO pode estar também indicando condição restritiva causada pela elevada resistência à penetração nessa camada (Tabelas 3 e 4). Constatou-se que, no PM, o IHO foi maior na profundidade de 10 a 15 cm o que se deve a ação das hastes do escarificador, ainda que fosse menor em comparação ao PC.

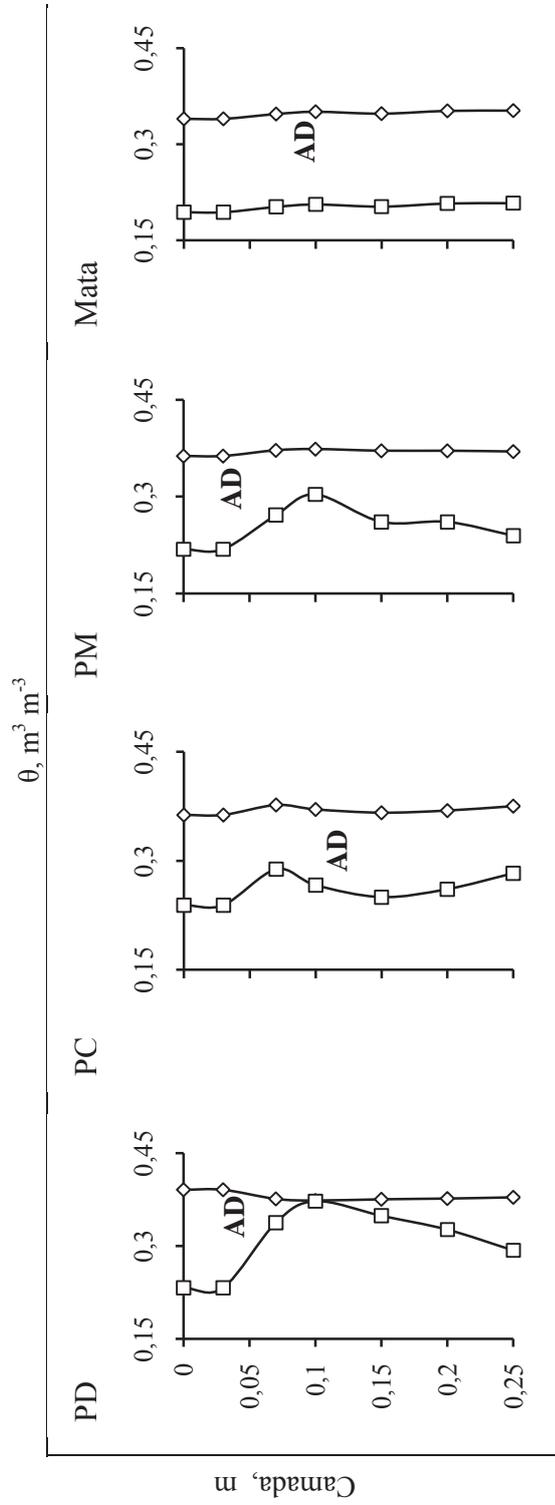


Figura 7. Perfis de distribuição da água disponível, calculado pelo método do IHO, de um Latossolo Vermelho distrófico, em função dos tipos de manejos de solo.

4.1.9 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado (CHSS) foi avaliada em parcelas sob os três tipos de manejo, porém somente nas rotações trigo/soja (R1) e trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja (R4). A ANAVA dos resultados da CHSS não mostrou interações ou diferenças isoladas entre os fatores estudados (Apêndice A).

Os valores da camada de 0 a 7,5 cm foram maiores que os da camada de 10 a 17,5 cm, não houve, porém, diferenças dentro das duas camadas dos tratamentos avaliados (Tabela 9). Os valores de CHSS da mata foram superiores aos dos solos sob uso agrícola, mesmo se considerando que não foi possível compará-los estatisticamente.

Tabela 9. Valores médios de condutividade hidráulica do solo saturado de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de duas rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|---|---------|-------------------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Condutividade hidráulica do solo saturado, mm h ⁻¹ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 40 ⁽¹⁾ | 23,6 | 17 ⁽¹⁾ | 27,6 | 3,74* |
| Mata | 131 | 12,8 | 97 | 16,0 | 8,72* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; *houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Este atributo físico mostrou alto coeficiente de variação (C.V.), o que, de acordo com Montenegro e Montenegro (2006), é comum em solos submetidos ao uso agrícola, uma pequena variação

na densidade do solo ser suficiente para promover uma importante variação na CHSS. O valor elevado de C.V. da camada de 10 a 17,5 cm reflete, inclusive, o valor nulo de CHSS de uma das amostras.

Os valores de CHSS observados na camada de 10 a 17,5 cm coincidem com o baixo valor de IHO da camada de 6,8 a 20 cm, e também com baixos valores de macroporosidade, elevados valores de resistência à penetração e densidade do solo desta camada. Isto evidencia que a camada de 6,8 a 20 cm é muito compactada. Os valores de CHSS desta camada, no PM não indicaram haver efeito favorável da ação das hastes do escarificador na melhoria deste atributo, ao contrário do observado por Câmara e Klein (2005b). Estes autores compararam a CHSS de PD e de PM e verificaram que a escarificação aumentou a condução da água, mesmo após 12 meses após a operação embora, isto não foi constatado no presente estudo.

O menor volume de macroporos e criptoporos na camada de 6,8 a 20 cm alterou, em nível restritivo, os atributos físicos, como a resistência à penetração do solo, o intervalo hídrico ótimo e condutividade hidráulica do solo saturado, principalmente no PD.

4.1.10 Correlações entre atributos físicos do solo

Foram feitas correlações entre todos os atributos físicos analisados em Laboratório e constatadas somente algumas relações de valores baixos de coeficiente de correlação (r). Na maioria dos atributos correlacionados foram observados valores fracos do coeficiente r . Os maiores coeficientes (fortes) de correlação foram verificados entre atributos de densidade e resistência à penetração (Tabela 10).

A compactação da camada de solo, caracterizada como de ocorrência generalizada abaixo dos 6,7 cm não foi constatada apenas no experimento deste trabalho, pois Spera et al. (2004, 2006, 2007, 2008, 2009) observaram esta camada em outros experimentos e diagnósticos de campo, na região de Passo Fundo, entretanto, poucos atributos físicos mostraram correlação com valores de r considerados moderados e nenhum mostrou correlação forte ou muito forte.

Tabela 10. Correlações (Pearson) entre atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Variáveis correlacionadas | Correlação (r) | P (r = 0) | Amostras correlacionadas |
|---------------------------|----------------|-----------|--------------------------|
| DS e RP 0,01 kPa | 0,48 | <0,0001 | n = 54 |
| DS e RP 0,5 kPa | 0,51 | <0,0001 | n = 54 |
| DR e RP 0,01 kPa | 0,49 | <0,0001 | n = 54 |
| ADA e RP 0,5 kPa | 0,47 | <0,0001 | n = 54 |

DS = densidade do solo; RP = resistência à penetração nas tensões de 0,01, 0,3 e 0,5 kPa respectivamente, DR = densidade relativa e ADA = argila dispersa em água. P = probabilidade.

4.2. Atributos químicos

Os resultados da ANAVA mostraram que os valores dos atributos químicos avaliados no solo não foram influenciados pela interação entre manejo de solo e rotação de culturas, exceto a relação Ca:Mg, obtida na camada de 0 a 6,7 cm; e da relação Ca+Mg/K, de ambas as camadas. Por outro lado, houve efeito isolado dos fatores estudados, que variaram com o atributo avaliado, conforme discutido a seguir. (Apêndice B).

4.2.1 Acidez do solo

Em geral, os maiores valores de pH e do índice SMP foram observados no PC e os menores no PD (Tabela 11), porém, os valores de pH da camada de 0 a 6,7 cm, não diferiram entre os manejos de solo. Já os valores da mata foram menores que os tratamentos. O teste t pareado mostrou que os valores de pH e do índice SMP diferiram entre ambas as camadas.

Os valores de pH, são considerados baixos, de acordo com CQFS-RS/SC (2004) sendo devido a não reaplicação de calcário, nos últimos 22 anos, antes da amostragem. No presente estudo, os valores de pH se estabilizaram próximos de 5,0, pois, de acordo com Ernani (2008), mesmo na ausência de calagem, adições de grande quantidade de sais fertilizantes ocasionam reações secundárias que afetam os níveis de atividade relativa do H^+ da solução.

Embora o calcário não tenha sido reaplicado, em todos os tratamentos, desde 1987, a correção da acidez deveria ter sido realizada quando o pH em água fosse menor que 5,5, no PD; ou 6,0, no PC; desde que a saturação por bases fosse menor que 65% no PD

(CQFS–RS/SC, 2004). O critério adotado no experimento, no entanto, foi o de efetuar calagem quando o pH fosse menor que 5,0 na camada de 0 a 5 cm, conforme Pöttker (1995a; 1995b) e Pöttker e Ben (1998), mesmo para valores de saturação por alumínio maiores que 10%. Porém, tal critério se mostrou inadequado para as condições do presente estudo, pois os rendimentos obtidos foram aquém do potencial de produção, e os teores de Al foram elevados e os de Ca e Mg, menores que os valores críticos.

Tabela 11. Valores médios de pH e índice SMP de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| pH | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 4,96 | 2,0 | 4,95b | 1,6 | 5,49* |
| PC | 5,08 | 2,0 | 5,07a | 2,3 | 4,13* |
| PM | 5,02 | 2,0 | 4,97b | 2,3 | 5,00* |
| Rotações ⁽²⁾ | 5,02 | 1,7 | 5,00 | 2,2 | 8,66* |
| Mata | 4,42 | 4,3 | 4,17 | 0,1 | 3,47* |
| Índice SMP | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 5,37b | 1,6 | 5,33b | 1,7 | 7,62* |
| PC | 5,53a | 1,0 | 5,46a | 1,9 | 4,10* |
| PM | 5,46ab | 1,0 | 5,38ab | 2,0 | 3,33* |
| Rotações ⁽²⁾ | 5,45 | 1,2 | 5,39 | 2,3 | 7,87* |
| Mata | 5,33 | 2,3 | 4,97 | 1,9 | 2,29 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os valores de pH, na camada de 6,8 a 20 cm foram menores que o valor crítico utilizado para decidir sobre a necessidade

de aplicar calcário, mesmo nas parcelas sob manejo conservacionista (PD e PM), conforme CQFS – RS/SC (2004). No entanto, a diferença de pH entre as camadas foi pequena, sendo inexpressiva, em termos agronômicos.

O adiamento da reaplicação de calcário, como ocorreu no experimento do presente trabalho, tem sido comum entre agricultores do Planalto Médio do RS (MARTINAZZO, 2006).

A camada de menor pH (6,8 a 20 cm) também foi a camada mais compactada (item 4.1), conferindo a esta camada, além de grande restrição física, restrição química. A maior acidez na camada de 6,8 a 20 cm também é evidenciada pelos valores do índice SMP, porém, conforme observado com este indicador e o pH em água, a acidificação não foi exclusiva dos tipos de manejo conservacionistas (PD e PM), conforme já relatados por Kochhann (1990), pois esta foi observada no PC (Tabela 11). Assim, pode-se especular que a acidificação, no solo revolvido, se processou em um intervalo de pelo menos duas safras, período entre os revolvimentos. Em manejos conservacionistas, além da reacidificação natural ela pode ser devido ao uso de fertilizantes nitrogenados e a acidificação que estes promovem ao penetrar no solo, cerca de até 10 cm, percorrendo os sulcos abertos pelos sulcadores das semeadoras, conforme constatou Kochhann (1990), mesmo que a aplicação de N seja aplicada em maior proporção, em cobertura.

Após 22 anos da última calagem, era esperado que o valor do pH em água do solo em todos os tratamentos fosse mais baixo do que o obtido. Os valores obtidos foram próximos a 5,0, em ambas as camadas. Isso indica que, no Latossolo Vermelho do experimento,

mesmo com ausência de calagem, o pH não retornou aos níveis originais do solo, conforme constatado por Azevedo et al. (1996), em trabalho com Latossolo Bruno suave ondulado, com textura e acidez semelhantes e, teor de matéria orgânica ligeiramente maior, sendo ainda expressivamente superior.

Diversos estudos sobre caracterização de solos sob diferentes tipos de manejo diferem dos resultados obtidos no presente trabalho (OLIVEIRA et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2004; LANGE et al., 2006). Ciotta et al. (2004) consideraram que o maior valor de pH obtido pelos autores citados, na camada de 0 a 5 cm, foi devido à correção do solo na camada superficial com a reaplicação de calcário, ainda que os valores de pH tenham sido cerca de 5,1, valores estes, entretanto, baixos para um solo recém corrigido. Estes autores, porém, só observaram a acidificação em solo manejado sem revolvimento.

Na Tabela 12, constam-se os resultados dos valores de saturação por bases (V), em função dos fatores avaliados no experimento. Os valores médios de V dos tratamentos, em ambas as camadas, foram menores que os valores críticos de 80% e 65%, indicados pela CQFS-RS/SC (2004), para se proceder a calagem, tanto em solo manejado com PC, como com PD, respectivamente.

Os valores da saturação por Al obtidos em todos os tratamentos foram maiores 10%, que é o valor crítico utilizado como critério secundário para avaliar a necessidade de calagem, em solos sob PD, quando a interpretação do valor do pH em água discorda do valor de saturação por bases (CQFS-RS/SC, 2004). Mesmo na camada 0 a 6,7 cm, onde, geralmente, há maior acúmulo de material orgânico e de cátions de reação básica trocáveis, que são os principais

responsáveis pela menor expressão do Al tóxico (ANGHINONI e SALET, 2000; MIYAZAWA et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2002), a saturação por Al também foi maior que 10%. Os valores de Al, saturação por bases e saturação por Al diferiram entre as camadas de 0 a 6,7 e de 6,8 a 20 cm (Tabela 12).

Tabela 12. Valores médios de alumínio, saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico, submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--|------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Al, cmol _c kg ⁻¹ | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 0,96 | 5,2 | 1,39 | 5,5 | 11,61* |
| Mata | 1,24 | 12,8 | 2,71 | 3,9 | 3,17* |
| V, % | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 37 | 8,1 | 32 | 14,5 | 10,56* |
| Mata | 29 | 9,4 | 12 | 17,7 | 3,10* |
| m, % | | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 17 | 5,2 | 26 | 5,5 | 13,66* |
| Mata | 27 | 22,5 | 59 | 7,1 | 3,48* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Como em ambas as camadas foram constatadas, em todos os tratamentos, valores de saturação por alumínio maior que 10%, isso indica que, após vários anos sem calagem, o Al neutralizado pelos ânions carbonáticos foi solubilizado, não retornando, porém, a valores maiores que os da condição original do solo (mata) (Tabela 12).

Os teores de Al trocável observados neste trabalho (Tabela 12), foram maiores que os níveis considerados tóxicos às plantas, em

geral $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (CQFS–RS/SC, 2004). Os menores valores de Al coincidiram com os maiores valores de pH, havendo forte correlação inversa entre estes parâmetros ($r = -0,70$; $p < 0,0001$), conforme esperado e também observado por Sousa et al. (2007).

No presente trabalho, foi verificada redução dos valores de pH, do valor V, dos teores de cátions de reação básica e aumento do teor de Al trocável, em função do tempo de cultivo sem reaplicação de calcário, além de se cultivar duas safras anuais. Com base em informações de diversos trabalhos, Oliveira et al. (2002) relatam a ocorrência de alterações nos indicadores de acidez das camadas superficiais, principalmente em solos sob PD. Estes autores destacam como determinantes da magnitude dessas mudanças, os teores iniciais dos cátions de reação básica trocáveis, o tempo de cultivo, os teores de cátions e de carbono solúvel dos resíduos culturais em superfície, da capacidade de acidificação das raízes das culturas que compõem as rotações de culturas e do manejo da adubação nitrogenada.

Os teores de Ca, em todos os tratamentos, foram maiores que os do solo com mata (Tabela 13). Isso indica que a reacidificação do solo dos tratamentos testados não foi devido somente a perdas de Ca.

Na camada 0 a 6,7 cm no PD, os teores de Ca foram maiores em comparação ao PC. Constatou-se, também, na média dos tratamentos, maior teor de Ca nessa camada. Porém, se constatou correlação fraca entre os teores de Ca e a densidade do solo, ou outro atributo físico equivalente.

Em todos os tratamentos, os valores de Ca foram menores que $4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, considerado o valor crítico conforme CQFS -

RS/SC (2004), enquanto que os valores de Mg foram ligeiramente maiores que o valor crítico estabelecido por esta Comissão (2,0 cmol_c dm⁻³) (Tabelas 13 e 14).

Tabela 13. Valores médios de cálcio de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--|------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 - 6,7 | | 6,8 - 20 | | |
| | | C.V., % | | C.V., % | |
| Ca, cmol _c kg ⁻¹ | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 2,91a | 9,2 | 2,51 | 6,9 | 6,15* |
| PC | 2,49b | 8,7 | 2,49 | 12,6 | 2,83* |
| PM | 2,69ab | 8,6 | 2,35 | 9,0 | 6,38* |
| Rotações ⁽²⁾ | 2,70 | 8,0 | 2,45 | 9,6 | 6,93* |
| Mata | 2,03 | 14,5 | 1,01 | 17,7 | 3,18* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

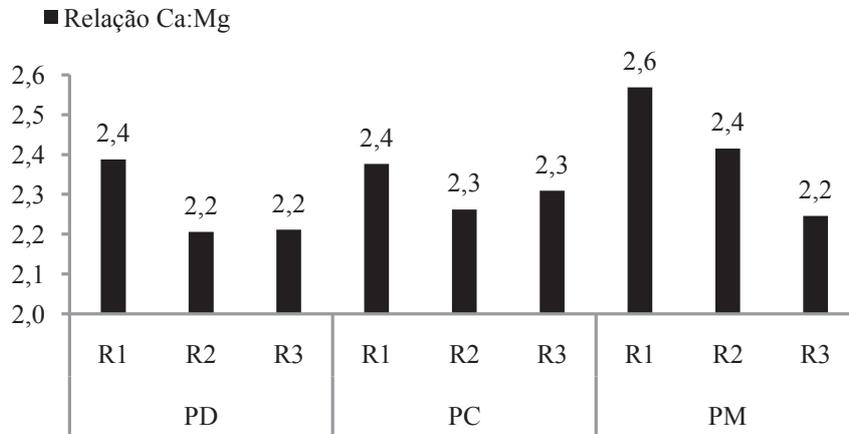
Neste trabalho, os maiores teores de Mg do solo foram observados na camada de 0 a 6,7 cm (Tabela 14). Em razão da pouca solubilidade do calcário, quando este é aplicado em superfície, e da pouca estabilidade de ânions carbonáticos derivados da dissolução do calcário, não é esperado que ocorra correção da acidez, e aumento da disponibilidade de Ca e de Mg em profundidades menores que 10 cm, principalmente, aquelas situadas abaixo de uma camada compactada (MIYAZAWA et al., 2000). Isso explica o fato da correção da acidez e o suprimento de Ca e de Mg, ficar restrita às camadas superficiais do solo, quando o calcário é aplicado em superfície e não há revolvimento do solo (OLIVEIRA et al., 2002).

Tabela 14. Valores médios de magnésio de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|-------------------------------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Mg, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 1,24 | 11,8 | 1,02 | 13,6 | 7,41* |
| Mata | 1,17 | 5,4 | 0,84 | 16,3 | 4,83* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os resultados da ANAVA da relação Ca:Mg mostraram que, na camada de 6,8 a 20 cm houve interação entre os fatores avaliados, e efeito isolado da rotação de culturas, na camada de 0 a 6,7 cm (Figura 8, Tabela 15 e níveis de significância no Apêndice A). O teor de Ca, em todos os tratamentos, foi maior que o de Mg, mas a relação Ca:Mg foi menor que 3. A faixa ideal da relação destes dois cátions, no entanto, varia de 2 a 4, conforme Vitti et al. (2006), mas essa relação é importante somente se um destes dois nutrientes está deficiente, como observado em experimentos, em relação ao Ca (CQFS – RS/SC, 2004).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 8. Valores da Relação Ca:Mg da camada de 6,8 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetido a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas, após 22 anos sem calagem.

Os tipos de manejo de solo avaliados não mostraram diferenças na relação Ca:Mg, em ambas as camadas (Tabela 15). Constatou-se menor valor da relação Ca:Mg na camada 0 a 6,7 cm da rotação trigo/soja e ervilhaca/sorgo (R2) (Figura 8), sendo que isto pode ser atribuído à maior ciclagem de Mg desta rotação (MALAVOLTA, 2006). No entanto, a diferença entre os valores da relação Ca:Mg foi pequena, sendo de 0,2 entre a R1 e a R2, na média dos manejos de solo (Tabela 15).

Tabela 15. Valores médios da Relação Ca:Mg de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Relação Ca:Mg | | | | | |
| Manejos ⁽¹⁾ | 2,3 | 8,6 | 2,4 | 4,5 | 1,82 ^{ns} |
| R1 ⁽²⁾ | 2,4a | 7,8 | 2,4 | 6,0 | 0,10 ^{ns} |
| R2 | 2,2b | 12,6 | 2,4 | 11,0 | 3,06* |
| R3 | 2,3ab | 9,8 | 2,3 | 10,4 | 0,37 ^{ns} |
| Mata | 1,5 | 16,6 | 1,1 | 21,1 | 1,42 ^{ns} |

R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, não diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os resultados da ANAVA dos teores de Mn do solo mostraram que não houve efeito da interação entre manejo de solo e rotação de cultura, mas houve efeito isolado de ambos os fatores (Apêndice B). Os maiores teores de Mn do solo foram observados na camada de 0 a 6,7 cm dos manejos PD e PM. Os valores da mata, ainda que não comparados estatisticamente, foram maiores (Tabela 16), os quais também têm menores valores de pH (Tabela 11). Houve também maiores teores de Mn na camada 6,8 a 20 cm no PD e PC em relação ao PM. A rotação trigo/soja (R1) mostrou menor teor de Mn na camada de 0 a 6,7 cm. Os teores de Mn não diferiram entre ambas as camadas do PD e entre as estas nas rotações R1 e R2.

O Mn, embora considerado um micronutriente, pode ocorrer em níveis tóxicos em latossolos da região de Passo Fundo (ESCOSTEGUY et al., 2006). No experimento não foram aplicados

fertilizantes exclusivamente contendo Mn, porém, este micronutriente está presente no superfosfato triplo, em baixa concentração (MALAVOLTA, 1994). O solo do experimento, sendo de origem basáltica, contém teores elevados desse metal em sua composição (PEREZ et al., 1997). Estes aspectos explicam os teores observados, que foram maiores que o nível considerado alto ($5,0 \text{ mg dm}^{-3}$) pelos critérios da CQFS – RS/SC (2004).

Tabela 16. Valores médios de manganês de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|-------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Mn, mg kg^{-1} | | | | |
| PD | 49a | 6,3 | 42a | 6,3 | 0,77 ^{ns} |
| PC | 28b | 5,3 | 42a | 5,8 | 2,41* |
| PM | 42ab | 6,2 | 31b | 5,9 | 5,00* |
| R1 | 35b | 7,0 | 35 | 5,9 | 2,24 ^{ns} |
| R2 | 40ab | 6,7 | 39 | 6,5 | 1,74 ^{ns} |
| R3 | 44a | 6,1 | 41 | 6,2 | 2,43* |
| Mata | 92 | 7,7 | 68 | 16,7 | 2,83* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

A tendência do teor de Mn trocável ser mais elevado em solos com PD, em relação ao PC, não pode ser explicada apenas pelos valores de pH do solo. No PD, a aplicação superficial de calcário resulta em valores de pH mais elevados em superfície, o que, em consequência, deveria diminuir e não aumentar o teor desse micronutriente. As maiores quantidades de Mn no PD têm sido

atribuídas ao teor mais elevado de MO existente nos solos com este manejo (MOREIRA et al., 2006).

Borkert (1991) cita ocorrência de toxidez de Mn em solos do Planalto Médio gaúcho. No presente trabalho, apesar dos níveis elevados de Mn, sintomas de toxidez não foram, em 22 anos, observados em plantas de soja. No entanto, como os sintomas se manifestam em situação extrema de estresse causado por este cátion, isto não significa que o rendimento das plantas não esteja sendo limitado pelo alto teor de Mn deste solo.

4.2.2 Capacidade de troca catiônica (CTC)

Os resultados estatísticos do atributo CTC mostram efeitos isolados dos fatores tipos de manejo e de rotações, no entanto, não houve interação entre estes fatores (Apêndice B). Os valores médios da CTC do solo foram maiores com PD e menores com o PC, em ambas as camadas (Tabela 17). Foram também maiores nas rotações com quatro ou mais espécies, na camada de 0 a 6,7 cm.

Entre os tipos de manejo, a CTC do PD foi maior. Na camada de 6,8 a 20 cm, a CTC do solo de mata foi maior, sendo consequência da alta acidez potencial. Nos manejos PD e PM, a maior CTC da camada de 6,8 a 20 cm se deveu ao maior valor de acidez potencial ($H + Al$) e aos menores valores de pH, índice SMP e de Ca (Tabelas 10 e 12). Na camada de 0 a 6,7 cm, a CTC da rotação R3 foi maior que a da R1.

Tabela 17. Valores médios da capacidade de troca catiônica (CTC) de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|------------|---|----------|---|--------------------|
| | 0 – 6,7 | | 6,8 - 20 | | |
| | C.V., % | CTC, cmol _c kg ⁻¹ | C.V., % | CTC, cmol _c kg ⁻¹ | |
| PD | 14,4a | 3,2 | 13,8a | 7,9 | 3,13* |
| PC | 11,5b | 7,6 | 11,6c | 6,0 | 1,15 ^{ns} |
| PM | 12,5b | 5,6 | 12,4b | 5,2 | 1,70 ^{ns} |
| R1 | 12,4b | 9,7 | 12,2 | 8,4 | 2,22 ^{ns} |
| R2 | 12,7ab | 11,0 | 12,9 | 10,9 | 2,36 ^{ns} |
| R3 | 13,2a | 11,8 | 12,7 | 7,2 | 1,35 ^{ns} |
| Mata | 13,3 | 15,9 | 16,9 | 8,2 | 0,39 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

4.2.3 Matéria orgânica, fósforo e potássio

O resultado da ANAVA da matéria orgânica do solo (MOS) não mostrou diferenças entre os fatores estudados nem interação destes (Apêndice B). A Tabela 18 mostra que os maiores teores de MOS foram observados na camada de 0 a 6,7 cm.

Neste trabalho, os teores de MOS observados indicaram que, após 22 anos de cultivo sem reaplicação de calcário, independente do tipo de manejo ou de rotação, mantiveram-se estáveis, em relação aos teores do início do experimento. Na época da instalação do experimento o teor de MOS, na camada de 0 a 20 cm, foi de 32 g kg⁻¹ (ou 34 g dm⁻³) (item 3.2). Por outro lado, em ambas as camadas avaliadas, o conteúdo de MOS foi maior no solo da mata. Entretanto, tem sido constatado, na maioria dos trabalhos realizados sobre o PD (SANTOS et al., 2003, 2004; COSTA et al., 2004; SISTI

et al., 2004; OLIVEIRA et al., 2004; ALMEIDA et al., 2005; LOSS et al., 2009), que os valores de MOS são geralmente maiores neste tipo de manejo. Sisti et al. (2004) inclusive, observaram no PD maiores teores de MOS que os de mata.

Tabela 18. Valores médios da matéria orgânica do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|-------------------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | MOS, g kg ⁻¹ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 34 | 10,5 | 29 | 12,5 | 6,90* |
| Mata | 51 | 12,5 | 35 | 12,1 | 4,30* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

De acordo com Calegari et al. (2008), nas rotações com maior número de espécies leguminosas, os teores de MOS têm sido maiores, pois as espécies de poáceas, aveia, trigo e sorgo, que demandam mais N e possuem sistema radicular mais profundo, absorvem maior quantidade de N do solo e, portanto, favorecem menor formação de matéria orgânica em relação às leguminosas. No entanto, no presente trabalho, as rotações contaram com números equilibrados de espécies das duas famílias botânicas. O solo do presente estudo possui baixa declividade e as perdas por erosão no PC são mínimas, aliado ao fato de que as parcelas deste tratamento estão entre parcelas com manejos conservacionistas, resultando assim, em maior MOS.

A ANAVA dos resultados do teor de MOS e das

respectivas frações particulada (MOP) e mineral (MOM) mostrou que não houve interações entre os fatores estudados. Porém, houve diferenças entre ambas as camadas avaliadas (Apêndice D). Os resultados da Tabela 19 mostram que não houve diferenças, entre os fatores estudados dos teores de MOS, MOP e MOM, em ambas as camadas.

Tabela 19. Valores médios do teor de matéria orgânica do solo (MOS) e das respectivas frações particulada (MOP) e associada aos minerais (MOM) de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|-------------------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | MOP, g kg ⁻¹ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 8,3 | 8,7 | 7,2 | 7,3 | 4,17* |
| Mata | 14,2 | 15,8 | 10,2 | 14,6 | 8,52* |
| | MOM, g kg ⁻¹ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 21,2 | 5,2 | 19,7 | 4,1 | 3,21* |
| Mata | 32,3 | 16,4 | 23,6 | 13,0 | 8,88* |
| | MOS, g kg ⁻¹ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 29,4 | 5,5 | 26,8 | 4,5 | 30,42* |
| Mata | 46,5 | 15,8 | 33,8 | 13,5 | 8,86* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

No trabalho de Debiasi (2008) também não foram observadas diferenças no teor de MOP, em experimento que comparou o PD com e sem escarificação, em um Argissolo Vermelho com baixa declividade. No entanto, este autor observou maior teor de MOP em parcelas cultivadas com aveia preta mais ervilhaca, em relação ao

cultivo de milho com soja, concluindo que, em curto prazo (4 anos), o teor de MOP é maior sob cultivos com maior aporte de matéria seca.

Os valores de MOP e MOM, verificados neste estudo, foram semelhantes aos observados por Debiasi (2008). Este autor explicou os resultados pelo maior aporte de material orgânico produzido pelo sistema radicular das culturas. Isto já tinha sido confirmado por Beutler (2005), em trabalho realizado na mesma área daquele experimento. Assim, a tendência das frações MOP e MOM serem diferentes, nas camadas de 0 a 6,7 cm e de 6,8 a 20 cm, pode estar relacionada ao efeito do aporte de matéria orgânica pelas culturas.

A semelhança dos teores de frações de MOS entre os tratamentos, indicam que a aeração do solo promovida pela movimentação do solo sob PC, em comparação ao PD e aos PM, foi insuficiente para acelerar a decomposição da matéria orgânica, tanto a livre no solo, como a oclusa em agregados, concordando com os resultados de Beutler (2005).

Em ambas as camadas, o teor de P nos sistemas de manejo conservacionistas foram maiores que no PC. Em todos os tipos de manejo de solo e de rotações de culturas avaliadas, até a profundidade de 20 cm, o teor de P foi maior que $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$, considerado o valor crítico, na classe de textura do solo estudado (CQFS –RS/SC 2004).

Os teores muito altos de P nas camadas de 0 a 20 cm indicam que a quantidade adicionada com os fertilizantes foi superestimada e que os níveis biodisponíveis desse nutriente não estão sendo afetados pelo pH do solo, pois a fixação de P não foi suficiente para reduzir a biodisponibilidade abaixo do nível crítico. É importante

destacar que, por outro lado, a elevação da disponibilidade de P, promovida por adubações sucessivas, que também foi verificada no presente estudo, também melhora as condições de solo que promovem o crescimento e desenvolvimento de plantas (ERNANI et al., 2001).

Tabela 20. Valores médios do teor de fósforo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | | 6,8 - 20 | | |
| | | C.V., % | | C.V., % | |
| | P, mg kg ⁻¹ | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 50a | 10,6 | 36a | 5,8 | 1,76 ^{ns} |
| PC | 24b | 12,5 | 21b | 5,7 | 0,23 ^{ns} |
| PM | 44a | 15,5 | 34a | 5,3 | 0,07 ^{ns} |
| Rotações ⁽²⁾ | 40 | 13,5 | 39 | 5,9 | 0,79 ^{ns} |
| Mata | 7 | 13,4 | 5 | 1,0 | 2,43 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

O maior valor de P foi constatado no PD e no PM, onde também foram observados maiores teores de Ca. Apesar de não ter sido constatada diferenças entre as camadas pelo teste t pareado, os resultados confirmaram a tendência de acúmulo de P na superfície de solos sob manejo conservacionistas, que também foi verificada em outros trabalhos (MOREIRA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002; SANTOS et al., 2003; 2004).

Os teores de K extraídos do solo foram maiores na camada de 0 a 6,7 cm, independente do tipo de manejo do solo ou de rotação de culturas (Tabela 21). Porém, o valor de K diferiu entre as duas

camadas avaliadas e a interpretação desse nutriente correspondeu, nas duas camadas, à classe de K muito alto ($> 120 \text{ mg dm}^{-3}$; CQFS – RS/SC, 2004). Em todos os tratamentos avaliados, o teor de K foi maior que 60 mg dm^{-3} , como a CTC se situa entre 5 a $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (CQFS – RS/SC, 2004), os resultados também mostram que os teores de K foram muito maiores que o teor considerado crítico, indicando que o K não necessita ser aplicado, ao menos na safra seguinte.

Tabela 21. Valores médios do teor de potássio de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

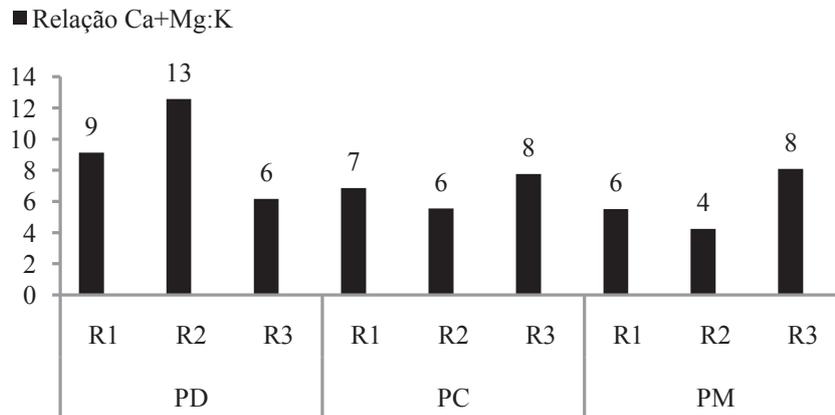
| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | K, mg kg^{-1} | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 356 | 5,4 | 209 | 12,6 | 7,36* |
| Mata | 88 | 19,2 | 44 | 16,6 | 1,33 ^{ns} |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Assim como verificado com o P, os níveis de K obtidos nos tratamentos avaliados também foram muito altos, até a profundidade de 20 cm. O excesso de K, além de favorecer perdas do nutriente por transporte pelo deflúvio, dissolvido na água da enxurrada e por lixiviação (KOCHHANN et al., 2005) afetou a relação entre K e Ca+Mg, uma vez que os teores destes dois cátions bivalentes foram baixos ou médios.

Os resultados da ANAVA da relação Ca+Mg:K mostraram, em ambas as camadas, interação entre os fatores (Figuras 9 e 10), sem

no entanto, ter havido efeito isolado dos fatores (Apêndice B).

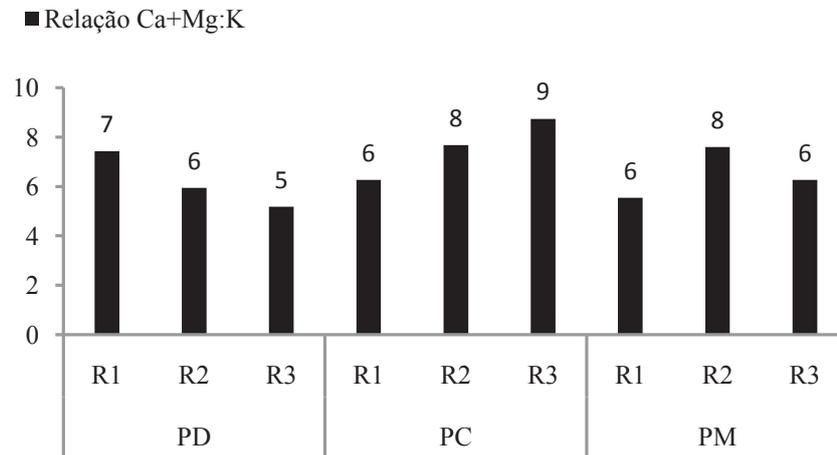


PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 9. Valores da relação Ca+Mg:K da camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetido a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas, após 22 anos sem calagem.

Houve efeito da interação entre o tipo de manejo e de rotação de culturas, nos valores da relação Ca+Mg:K das duas camadas avaliadas (Figuras 9 e 10). No PC e no PM, em todas as rotações, os valores foram inferiores a 12, indicando excesso de K na camada de 6,8 a 20 cm (Figura 10). No entanto, no PD, a R2 proporcionou maior valor da relação Ca+Mg:K, sendo este maior que 12, na camada superficial (Figura 9). Os valores foram menores na camada de 0 a 6,7 cm, e isto é devido ao acúmulo de K. Em geral, as rotações mostraram resultados distintos, conforme o tipo de manejo,

sem uma tendência clara.



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 10. Valores da Relação Ca+Mg:K da camada de 6,8 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas, após 22 anos sem calagem.

Os valores da relação Ca+Mg:K apresentados na Tabela 22 são menores do que aqueles relatados em Embrapa Soja (1999), que sugerem a faixa de 12 a 20. Segundo van Raij (1991), o Ca e o Mg devem perfazer 60% dos cátions, na $CTC_{pH7,0}$, e o K, 25%, sendo que, devido à inibição competitiva, o teor de K não deve ultrapassar o de Mg. De acordo com Embrapa Soja (1999) e van Raij (1991), os valores da relação Ca+Mg:K obtidos em ambas as camadas de solo do experimento foram baixos, indicando excesso de K no solo.

Tabela 22. Valores médios da Relação Ca+Mg:K de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Ca+Mg:K | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 7,3 | 5,8 | 6,8 | 3,8 | 0,87 ^{ns} |
| Mata | 18,0 | 20,5 | 16,9 | 9,1 | 2,61 ^{ns} |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os altos teores de P e de K que acumularam na camada superficial dos tratamentos avaliados podem estar relacionados a um menor nível de absorção destes nutrientes pelas plantas. Por outro lado, a acidez, a baixa disponibilidade de Ca, o excesso de Al e inadequada quantidade de fertilizantes aplicados podem ter promovido este acúmulo (SACRAMENTO e ROSOLEM, 1998; BERNARDI et al., 2009). O excesso de Al provoca inibição não competitiva do P (FLOSS, 2006). Por outro lado, isto poderia ter sido evitado, com o monitoramento do solo e a utilização do sugerido em CQFS – RS/SC (2004), pois deve ter ocorrido aplicação de fertilizantes em quantidade maiores que as recomendadas, ao longo do experimento.

4.2.4 Enxofre e micronutrientes

Os valores de enxofre (S) e de boro (B) variaram somente entre as rotações, sem efeito isolado de manejo de solo e de interação. Os teores de S foram maiores na rotação R3, em relação a R1 (Tabela 23). Não houve diferenças dos teores de S e de B entre as duas

camadas avaliadas.

Tabela 23. Valores médios de enxofre e de boro de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | 6,8 - 20 | C.V., % | Valor de t |
|------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 - 6,7 | C.V., % | | | |
| S, mg kg ⁻¹ | | | | | |
| Manejos ⁽¹⁾ | 12,8 | 9,9 | 12,6 | 9,9 | 0,36 ^{ns} |
| R1 ⁽²⁾ | 11,9b | 12,0 | 11,5b | 15,4 | 0,29 ^{ns} |
| R2 | 12,9ab | 14,2 | 12,8ab | 17,3 | 0,19 ^{ns} |
| R3 | 13,7a | 11,4 | 13,6a | 10,4 | 0,58 ^{ns} |
| Mata | 20,1 | 2,4 | 16,5 | 6,1 | 0,63 ^{ns} |
| B, mg kg ⁻¹ | | | | | |
| Manejos ⁽¹⁾ | 0,26 | 6,2 | 0,22 | 5,1 | 2,15 ^{ns} |
| R1 ⁽²⁾ | 0,43a | 8,2 | 0,40a | 9,4 | 0,74 ^{ns} |
| R2 | 0,17b | 9,2 | 0,10b | 9,4 | 1,60 ^{ns} |
| R3 | 0,17b | 8,9 | 0,14b | 9,0 | 1,30 ^{ns} |
| Mata | 0,63 | 13,6 | 0,59 | 10,9 | 5,64* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, não diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

De acordo com Floss (2006), a cultura da soja extrai muito S do solo. A adubação das parcelas do experimento foi realizada com superfosfato triplo, que contém aproximadamente 1,4% de S. De acordo com CQFS – RS/SC (2004), a cultura da soja necessita de 20 kg de S ha⁻¹ quando cultivada em solos com teor de S menor que 10 mg dm⁻³, sendo que os valores de S dos tratamentos estão próximos à este limite. A extração anual, de acordo com Ambrosano et al. (1997), que é de até 8 kg de S por uma tonelada de grãos colhidos, no tratamento trigo-soja, está propiciando a ocorrência de menores teores

de S. Todavia, os teores de S em todos os tratamentos e camadas foram maiores que o nível crítico estabelecido para fabáceas, como a soja (10 mg dm^{-3}); ou poáceas, como o trigo (5 mg dm^{-3}).

Os teores de S na mata, entretanto, foram elevados e indicam que a ciclagem desse nutriente foi alta, conforme relataram Bissani e Tedesco (1988).

O teor de B na camada superficial da rotação trigo-soja foi maior que as demais (Tabela 23). O B tem como fonte a MOS (CAMARGO, 1988) e a menor quantidade encontrada nas rotações que incluem aveia branca pode ser explicada pela elevada extração do nutriente que, de acordo com Floss (2006) é de até 40 g t^{-1} de grãos. Não foi efetuada aplicações de boro no experimento. Os teores disponíveis do micronutriente podem ser remanescentes dos originais (da mata) (DECHEN e NACHTIGALL, 2006) ou do residual de adubos aplicados, principalmente, o superfosfato triplo, que contém 110 g Mg^{-1} (MALAVOLTA, 1994). De acordo com CQFS – RS/SC (2004), os teores de B de todos os tratamentos situam-se na faixa alto ($> 0,3 \text{ mg dm}^{-3}$).

O teor de Zn, na camada de 0 a 6,7 cm, do solo sob manejo PD foi maior que no PC (Tabela 24). Os teores de Zn, dentro dos tipos de manejo de solo foram maiores na camada superficial, mas não houve diferenças entre as camadas, dentro das rotações. Os teores variaram de médios a altos, de acordo com os critérios de interpretação sugeridos por CQFS – RS/SC (2004). Como os teores de Zn na mata foram altos, isto indicou que, além da extração pelas culturas, a calagem, mesmo efetuada há 22 anos e a redução da MOS (DECHEN e NACHTIGALL, 2006), favoreceram a redução da

disponibilidade deste nutriente, o qual ainda pode ser fornecido em quantidades razoáveis pelo superfosfato triplo (MALAVOLTA, 1994).

Tabela 24. Valores médios de zinco de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|-------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Zn, mg kg ⁻¹ | | | | |
| PD | 0,93a | 6,4 | 0,58a | 6,3 | 2,60* |
| PC | 0,42b | 7,5 | 0,34c | 6,1 | 3,50* |
| PM | 0,57ab | 5,4 | 0,48b | 5,0 | 2,66* |
| R1 | 0,51 | 6,4 | 0,38b | 6,3 | 2,00 ^{ns} |
| R2 | 0,65 | 7,7 | 0,49ab | 6,5 | 1,80 ^{ns} |
| R3 | 0,76 | 9,2 | 0,51a | 6,0 | 1,96 ^{ns} |
| Mata | 1,36 | 24,2 | 0,96 | 13,6 | 1,73 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

Os resultados dos teores de cobre não mostraram interações ou diferenças entre os fatores estudados. Não houve diferenças entre as camadas dos tratamentos e da mata. Os teores de Cu foram altos, de acordo com a CQFS-RS/SC (2004). O valor médio dos tratamentos e camadas foi de 1,8 mg kg⁻¹, enquanto que o da mata foi de 2,3 mg kg⁻¹. Assim, neste estudo, o Cu está disponível na forma de complexos orgânicos (MENGEL e KIRKBY, 2001).

4.2.5 Correlações entre atributos químicos do solo

Na Tabela 25, constam os valores moderados, fortes e muito fortes dos coeficientes de correlação (r) obtidos entre os

atributos químicos do solo. Verificou-se que a maior parte dos atributos correlacionados que mostraram valores de r altos foram os que, normalmente, são dependentes, tais como as relações entre pH e saturação por Al, ou são influenciados pelo manejo químico, como a calagem e a adubação, tais como, o P e o K, o Ca e o Mg.

Tabela 25. Correlações (Pearson) moderadas, fortes e muito fortes entre atributos químicos um Latossolo Vermelho distrófico submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

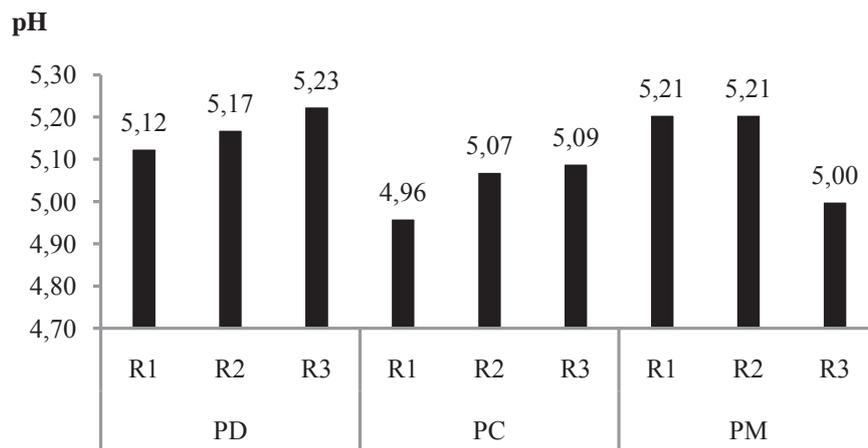
| Variáveis correlacionadas | Correlação (r) | P (r = 0) | Amostras correlacionadas |
|---------------------------|----------------|-----------|--------------------------|
| pH e m (%) | -0,50 | <0,0001 | n = 54 |
| Índice SMP e m (%) | -0,67 | <0,0001 | n = 54 |
| P e K | 0,58 | <0,0001 | n = 54 |
| Al e Ca | -0,65 | <0,0001 | n = 54 |
| Al e índice SMP | -0,72 | <0,0001 | n = 54 |
| Al e Mg | -0,63 | <0,0001 | n = 54 |
| Al e V (%) | -0,84 | <0,0001 | n = 54 |
| Ca e Mg | 0,72 | <0,0001 | n = 54 |
| Ca e V (%) | 0,82 | <0,0001 | n = 54 |
| Ca e m (%) | -0,78 | <0,0001 | n = 54 |
| Mg e V (%) | 0,74 | <0,0001 | n = 54 |
| Mg e m (%) | -0,75 | <0,0001 | n = 54 |
| Mn e CTC | 0,61 | <0,0001 | n = 54 |

P = probabilidade

4.2.6 Caracterização da solução do solo

Com base nos resultados da análise estatística (Apêndice E), observou-se que os valores de pH da solução do solo, na camada de 0 a 6,7 cm, variaram com a interação entre os fatores, e com o efeito isolado dos tipo de manejo e de rotações de culturas (Figura 11, Tabela 26). Entre as camadas, os valores de pH diferiram somente no manejo PM e na rotação T/S/E/Sg/Ab/S (R3).

Os valores de pH da solução do solo, na camada de 0 a 6,7 cm, em função da interação entre os fatores estudados estão ilustrados na Figura 11.



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3= trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 11. Valores de pH da solução do solo, na camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Os resultados ilustrados nesta figura mostram que o efeito da interação entre os fatores foi mais expressivo na R3, cujo valor de

pH foi maior no PD (5,2) e menor no PM (5,0). O mesmo pode ser observado na Tabela 26.

Tabela 26. Valores médios do pH da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|---------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 - 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| pH da solução | | | | | |
| PD | 5,17a | 3,1 | 5,11 | 2,4 | 0,73 ^{ns} |
| PC | 5,04b | 2,6 | 5,10 | 2,4 | 0,55 ^{ns} |
| PM | 5,14ab | 1,9 | 4,99 | 3,1 | 3,76* |
| R1 | 5,11ab | 3,1 | 5,12 | 2,3 | 0,15 ^{ns} |
| R2 | 5,07b | 2,8 | 5,11 | 3,2 | 0,51 ^{ns} |
| R3 | 5,18a | 2,1 | 4,96 | 1,9 | 3,66* |
| Mata | 4,97 | 0,9 | 4,86 | 2,6 | 1,13 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

4.2.6.1. Cátions da solução do solo

Os teores dos cátions analisados na solução do solo das duas camadas avaliadas foram obtidos, originalmente, em mmol L⁻¹ de solução (Apêndice C). Após, estes teores foram corrigidos de acordo com o volume de água e a densidade do solo e expressos com base em volume de solo (mmol dm⁻³).

Os maiores teores de Al da solução do solo foram observados no PC (Tabela 27). Entre as camadas houve diferenças dos teores de Al, somente no manejo PM, divergindo dos resultados mostrados por Meurer e Anghinoni (2006) e por Salet et al. (1999),

que encontraram maior teor de Al na solução de solo na camada superficial do PD. Esta divergência foi verificada, embora o estudo deste último autor tenha sido realizado em experimento similar, no mesmo local do presente estudo, mas com dez anos sem calagem. Porém, o Al em solução não variou entre as camadas do PD, do PC e da mata, e o teor de Al trocável foi menor na camada de 0 a 6,7 cm destes tratamentos (item 4.2.1, Tabela 12).

Tabela 27. Valores médios do alumínio da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|--------------------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Al, $\mu\text{mol}_c \text{kg}^{-1}$ | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 28c | 6,6 | 48 | 7,2 | 1,25 ^{ns} |
| PC | 76a | 4,6 | 81 | 6,7 | 0,34 ^{ns} |
| PM | 48b | 7,0 | 69 | 8,8 | 3,30* |
| Rotações ⁽²⁾ | 51 | 12,0 | 66 | 14,2 | 1,55 ^{ns} |
| Mata | 102 | 10,1 | 124 | 10,9 | 2,52 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os menores teores de Al na solução do solo do PD, observado na camada de 0 a 6,7 cm, em comparação ao PC e ao PM (Tabela 27) podem ser atribuídos ao efeito complexante dos maiores teores de COD (item 4.1.6.2, Tabela 37) (SALET et al., 1999; ZAMBROSI, 2004; VIEIRA et al., 2009), além de maiores teores de cátions de reação básica (item 4.1.6.1, Tabelas 28 e 29) (CIOTTA et

al., 2002; ERNANI, 2008), uma vez que o pH pouco variou entre os tipos de manejo, ou entre as camadas.

A correlação entre os valores de Al trocável e o Al da solução do solo resultou em valor de $r = 0,05^{ns}$ (muito fraco), explicando porque na Tabela 12 houve diferenças entre as camadas e na Tabela 27 não houve.

Tabela 28. Valores médios do cálcio da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|---------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Ca, mmol dm ⁻³ | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 1,16a | 5,1 | 0,42 | 6,1 | 8,79* |
| PC | 0,49b | 7,2 | 0,57 | 6,5 | 0,81 ^{ns} |
| PM | 0,65b | 4,5 | 0,50 | 7,5 | 1,46 ^{ns} |
| Rotações ⁽²⁾ | 0,75 | 11,8 | 0,50 | 12,2 | 2,72* |
| Mata | 0,71 | 22,9 | 0,35 | 18,6 | 4,82* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

No PD, os teores de Ca e de Mg da camada de 0 a 6,7 cm (Tabelas 28 e 29) foram maiores que a de 6,8 a 20 cm, concordando com o observado por Salet et al. (1999) e Zambrosi et al. (2008). Os teores de Ca e de Mg foram distribuídos uniformemente entre as camadas do PC. A maior concentração de Ca e de Mg na camada superficial, embora o solo não tenha recebido calcário nos últimos 22 anos, pode ser atribuída à ciclagem destes cátions pelos resíduos

culturais, que acumularam em superfície, e à menor complexação com PO_4^{-3} , em razão do pH baixo (NOLLA e ANGHINONI, 2006).

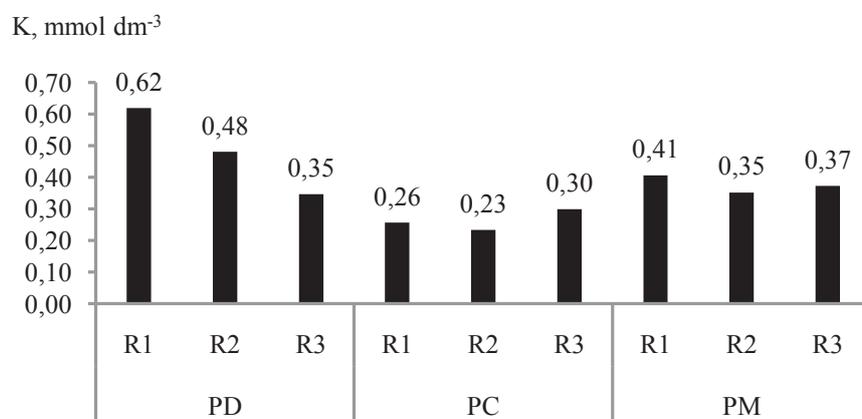
A correlação entre os valores de Ca e de Mg trocáveis e o da solução do solo resultou em valores de coeficiente r de Ca = 0,42** (moderado) e de Mg = 0,72*** (forte), diferentemente do verificado com o Al.

Tabela 29. Valores médios do magnésio da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|---------------------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Mg, mmol dm ⁻³ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 0,71 | 13,4 | 0,33 | 12,8 | 3,37* |
| Mata | 1,06 | 15,5 | 0,54 | 19,4 | 6,35* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os maiores teores de K da solução do solo foram observados no PD e os menores no PC, o que coincide com o observado por Salet et al. (1999). Em todos os tratamentos houve diferenças entre os teores de K nas camadas avaliadas (Figura 12 e Tabela 30). Isto ocorreu desta mesma forma com o K extraível (item 4.2.3 e Tabela 21).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 12. Valores do potássio da solução do solo da camada de 6,8 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Tabela 30. Valores médios do potássio da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------------------------|------------|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| K, mmol dm ⁻³ | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 0,93a | 5,2 | 0,48 | 5,8 | 3,42* |
| PC | 0,43b | 7,5 | 0,26 | 5,7 | 2,88* |
| PM | 0,57ab | 5,6 | 0,38 | 8,6 | 2,09* |
| Rotações ⁽²⁾ | 0,64 | 11,9 | 0,37 | 12,4 | 4,36* |
| Mata | 0,12 | 24,3 | 0,06 | 10,2 | 4,19* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Constatou-se, na camada 6,8 a 20 cm, que houve interação entre os fatores manejo de solo e rotação de culturas (Figura 12). Os dados sugerem que, nos manejos onde a camada compactada perdeu aspecto maciço (PC e PM), pode ter ocorrido maior absorção do nutriente da solução, e isto foi mais eficiente nos tipos de rotação com quatro ou mais espécies.

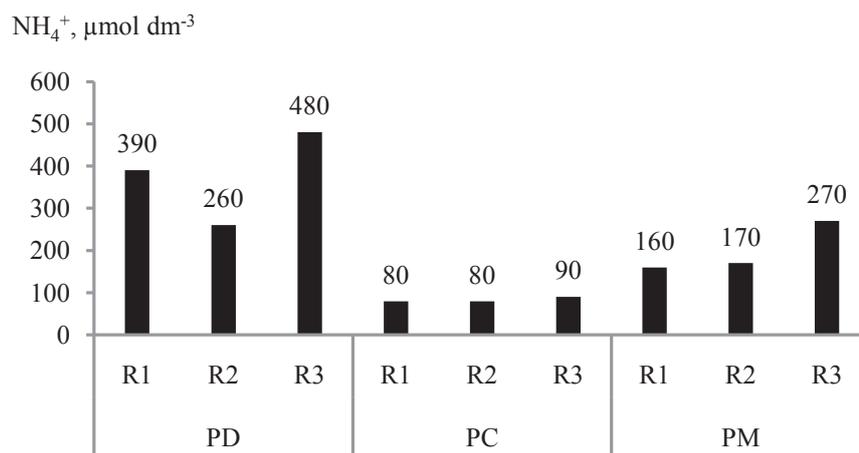
Como as doses de KCl aplicadas nos últimos cinco anos (Apêndice F) não foram altas, a lixiviação deste cátion não seria, portanto, expressiva, conforme observaram Della Flora et al. (2007). Além disso, no PD, há restrições na permeabilidade do solo (item 4.1), o que pode estar favorecendo acúmulo de K na camada superficial, embora os maiores teores de COD (item 4.2.6.2. e Tabela 37) possam facilitar a lixiviação (GEBRIM et al., 2008).

O valor do coeficiente de correlação obtido entre o teor de K extraível do solo e o da K da solução do solo foi $r = 0,62^{***}$ (forte). Este alto valor de r indicou que os teores de K da solução foram dependentes do K extraível no solo.

A relação de troca entre o K^+ e o $N-NO_3^-$ na absorção do nitrato pelas raízes, que é abundante na solução do solo do PD (item 4.2.6.2. e Tabela 34), pode ter favorecido a ciclagem do K, conforme Yamada e Roberts (2005).

Os teores de $N-NH_4^+$ na camada de 0 a 6,7 cm interagiram entre os fatores estudados. Os maiores teores de $N-NH_4^+$ da solução do solo foram observados na camada superficial da rotação T/S/E/Sg/Ab/S sob PD (Figura 13). Esta rotação produziu maior quantidade de MS e proporcionou maior teor de resíduos vegetais ao solo (item 4.3). Além disto, a inclusão da ervilhaca deve ter

contribuído para isto, pois esta espécie é eficiente fornecedora de N (SILVA et al., 2008).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 13. Valores do N-NH_4^+ da solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Os teores de N-NH_4^+ também foram maiores nas camadas superficiais dos tipos de manejos conservacionistas, enquanto que, no PC, eles não diferiram entre as camadas de solo avaliadas (Tabela 31).

Os valores de Eh observados (Apêndice C) variaram dentro da faixa de solos oxidados, conforme Sousa et al. (2006). Nestas condições, o NH_4^+ permanece estável por pouco tempo, logo oxidando à NO_3^- , quando o solo resseca, conforme relataram Fassbender e Bornemisza (1987).

Tabela 31. Valores médios do N-NH_4^+ da solução do solo e resultados do teste t pareado comparando duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|---|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | N-NH_4^+ , $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | |
| PD | 375a | 13,6 | 202 | 10,6 | 2,64* |
| PC | 84b | 7,7 | 85 | 6,7 | 0,14 ^{ns} |
| PM | 201b | 7,6 | 172 | 7,0 | 1,26 ^{ns} |
| R1 | 125c | 8,7 | 128 | 8,7 | 0,14 ^{ns} |
| R2 | 315a | 9,2 | 188 | 7,6 | 1,82 ^{ns} |
| R3 | 221b | 7,6 | 148 | 6,3 | 2,71* |
| Mata | 430 | 11,5 | 142 | 6,2 | 4,72* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

Os maiores teores de amônio nas camadas de 0 a 6,7 cm do manejo PD, então, devem ser oriundos de produtos da decomposição de maior quantidade de resíduos vegetais e da menor nitrificação. Araújo et al. (2004) observaram, no manejo PD, condições edáficas mais favoráveis à retenção do N-NH_4^+ do que no PC, havendo menor oxidação do NH_4^+ na camada superior do solo manejado com PD. No presente trabalho, as condições de Eh na camada superficial dos tipos de manejo não foram diferentes, e nem nas da mata, que, assim como no PD, os teores de N-NH_4^+ foram maiores. Portanto, estes maiores teores também podem ser atribuídos a maior quantidade de material orgânico ainda em decomposição.

As rotações com mais de quatro espécies produziram maior quantidade de matéria seca (item 4.3). Isto adicionou maior

quantidade de matéria orgânica ao solo e favoreceu maior ciclagem de Ca, Mg, K, N (NH_4^+) e Mn na camada superficial. De acordo com Amaral et al. (2004) e Silva et al. (2008), este efeito pode ser devido, principalmente, a ciclagem de nutrientes dos resíduos culturais de ervilhaca e de aveia branca.

Os teores de Mn foram maiores nas camadas superficiais do PD e da mata (Tabela 32). Porém, o teor de Mn trocável do solo, no presente trabalho, foi muito alto em todos os tratamentos, principalmente na mata.

Tabela 32. Valores médios do Mn^{2+} da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|-----------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Mn, $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 86a | 7,8 | 42 | 8,8 | 4,36* |
| PC | 11c | 8,7 | 11 | 7,0 | 0,13 ^{ns} |
| PM | 43b | 4,4 | 30 | 8,5 | 11,88* |
| Rotações ⁽²⁾ | 46 | 12,4 | 28 | 15,4 | 2,93* |
| Mata | 68 | 6,6 | 79 | 2,5 | 1,98 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os elevados teores de Mn, provavelmente, estão relacionados com os baixos valores de pH (MALAVOLTA, 2006). Maiores teores de MOS no solo deveriam reduzir a disponibilidade de Mn no solo, entretanto, isto não ocorre em solos com elevado conteúdo do elemento (KRAUSKOPF, 1973).

Não foram encontradas informações sobre níveis tóxicos de Mn em solução do solo, porém, Soratto et al. (2005) verificaram que teores de 16 mmol L^{-1} de Mn em solução nutritiva não induziram toxidez ao feijoeiro, valor este expressivamente maior que os obtidos no presente trabalho (Tabela 32).

4.2.6.2. Ânions da solução do solo

Os teores dos ânions analisados na solução do solo das duas camadas avaliadas foram obtidos, originalmente, em mmol L^{-1} de solução (Apêndice C). Assim como ocorreu com os cátions, estes teores foram corrigidos de acordo com o volume de água e a densidade do solo e expressos com base em volume (mmol dm^{-3}).

Os resultados mostrados na Tabela 33 indicam que o N-NO_2^- não variou entre os tratamentos, porém houve diferenças entre ambas as camadas estudadas (Apêndice E), ocorrendo em valores dentro da faixa de âmbito conhecido (FASSBENDER e BORNEMISZA, 1987). Na mata, também houve diferenças entre os teores de N-NO_2^- das camadas avaliadas.

Os resultados da Tabela 34 mostram que os teores de N-NO_3^- na camada de 0 a 6,7 cm foram maiores no manejo PD, havendo diferença entre as camadas. Nos demais tratamentos, não houve diferença dos teores de N-NO_3^- entre as camadas. Estes teores foram semelhantes aos valores máximos encontrados em solos de pastagens neozelandeses por Edmeades et al. (1985) e de solos com PD, relatados por Novais e Mello (2007).

Tabela 33. Valores médios do N-NO_2^- da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|--|---------|----------|---------|------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | N-NO ₂ ⁻ , μmol dm ⁻³ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 11 | 11,6 | 9 | 13,7 | 3,25* |
| Mata | 8 | 5,3 | 11 | 9,3 | 4,47* |

⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Tabela 34. Valores médios do N-NO_3^- da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|--|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | N-NO ₃ ⁻ , mmol dm ⁻³ | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 2,71a | 5,1 | 1,60 | 6,4 | 3,24* |
| PC | 1,81b | 6,2 | 1,77 | 6,4 | 0,12 ^{ns} |
| PM | 2,02b | 5,1 | 1,74 | 7,2 | 0,92 ^{ns} |
| Rotações ⁽²⁾ | 2,18 | 6,3 | 1,70 | 6,8 | 2,26* |
| Mata | 1,73 | 13,7 | 1,46 | 13,2 | 0,02 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Salet et al. (1999) observaram teores menores de N-NO_3^- na solução do solo em relação ao observado neste trabalho. Os resultados desses autores também foram obtidos de amostras retiradas em condição de umidade do solo similares. O N-NO_3^- , principalmente, o adicionado por fertilizantes, de acordo com Silva et al. (2004), tende a concentrar mais na solução do solo, em relação aos demais anions,

em razão da elevada solubilidade desse composto iônico e isto explica a diferença entre os teores médios das duas camadas das rotações de culturas.

O teor de N-NO_3^- da solução do solo com mata encontra-se dentro da faixa de âmbito conhecido, que, de acordo com os valores relatados por Edmeades et al. (1985), varia de 0 a $7,8 \text{ mmol L}^{-1}$ (ou cerca de 0 a $2,8 \text{ mmol dm}^{-3}$ de solo com umidade na capacidade de campo). Estes elevados teores de N encontrados no presente estudo pode ser explicado pela ciclagem matéria orgânica na mata, que ocorre em elevada quantidade, de além da contribuição da enxurrada proveniente de áreas de lavoura adjacentes e a montante da mata (GUADAGNIN et al., 2005).

Nas rotações R2 e R3, a ervilhaca, possivelmente, contribuiu com mais N em relação às outras espécies (MÜLLER et al., 2001), e isto resultou em maiores teores de N na forma nítrica ao sistema. Os teores de NO_3^- nas rotações também não variaram.

Os teores de S-SO_4^{2-} não diferiram entre as duas camadas, nem entre os tipos de manejo, mas diferiram entre as rotações, na camada de 6,8 a 20 cm. Nesta camada, o teor de S-SO_4^{2-} foi maior na rotação trigo/soja e ervilhaca/sorgo (Tabela 35). Os teores observados desse ânion foram próximos à média dos valores encontrados por Miranda et al. (2006) em duas camadas de solo de lavoura de cafeeiro. Os maiores valores de S-SO_4^{2-} encontrados na solução do solo da mata podem ser atribuídos parte à decomposição da matéria orgânica e parte a emissões industriais, uma vez que a área do experimento encontra-se próxima a indústrias de fundição (SÁ, 2005).

Tabela 35. Valores médios do $S-SO_4^{2-}$ da solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|------------------------|------------|--|----------|--|--------------------|
| | 0 – 6,7 | | 6,8 - 20 | | |
| | C.V., % | S- SO_4^{2-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | C.V., % | S- SO_4^{2-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | |
| Manejos ⁽¹⁾ | 37 | 13,6 | 34 | 10,8 | 0,78 ^{ns} |
| R1 ⁽²⁾ | 29 | 5,4 | 22c | 6,6 | 2,03 ^{ns} |
| R2 | 47 | 8,3 | 46a | 7,6 | 0,09 ^{ns} |
| R3 | 34 | 6,5 | 34b | 6,8 | 0,08 ^{ns} |
| Mata | 135 | 16,0 | 54 | 13,1 | 4,77* |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, não diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os teores de SO_4^{-2} foram maiores nas rotações R2 e R3, não diferindo entre as camadas, e, em geral, maiores na mata. Os menores teores foram observados na rotação T/S, na qual a cultura da soja é cultivada todo ano, e, como esta cultura é extratora de S da solução, os teores na solução foram menores (VITTI et al., 2006). De acordo com Bissani e Tedesco (1988), o S na forma de SO_4^{-2} é rapidamente ciclado no agrossistema e facilmente lixiviado (FLOSS, 2006).

Os valores de $P-PO_4^{3-}$ obtidos não variaram entre os tratamentos, nem entre as camadas estudadas (Tabela 36). Porém, foram maiores que os encontrados por Edmeades et al. (1985) e por Salet et al. (1999), embora se encontrem dentro da faixa de âmbito conhecido segundo Fassbender e Bornemisza (1987). O valor do coeficiente de correlação entre os teores de P extraível do solo e o PO_4^{-3} da solução foi 0,34^{ns} (fraco), o que evidenciou influência da fase

sólida do solo, na fixação do P.

De acordo com Zambrosi (2004), o P-PO_4^{3-} tem baixa mobilidade no solo e grande interação com a fase sólida. A dificuldade de se avaliar o P-PO_4^{3-} em solução do solo reside no fato de que é um ânion de detecção complexa (o nível mínimo de detecção no cromatógrafo Sykam é $0,1 \text{ mg L}^{-1}$), mas que tem a maior afinidade com a fase sólida entre todos os ligantes inorgânicos ou ácidos (AMARAL e VETTORAZZO, 2005).

Tabela 36. Valores médios do P-PO_4^{3-} da solução do solo e resultados do teste t pareado comparando duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|----------------------------|---|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | P- PO_4^{3-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | |
| Tratamentos ⁽¹⁾ | 5 | 11,4 | 5 | 13,6 | 0,41 ^{ns} |
| Mata | 4 | 8,8 | 4 | 9,7 | 0,80 ^{ns} |

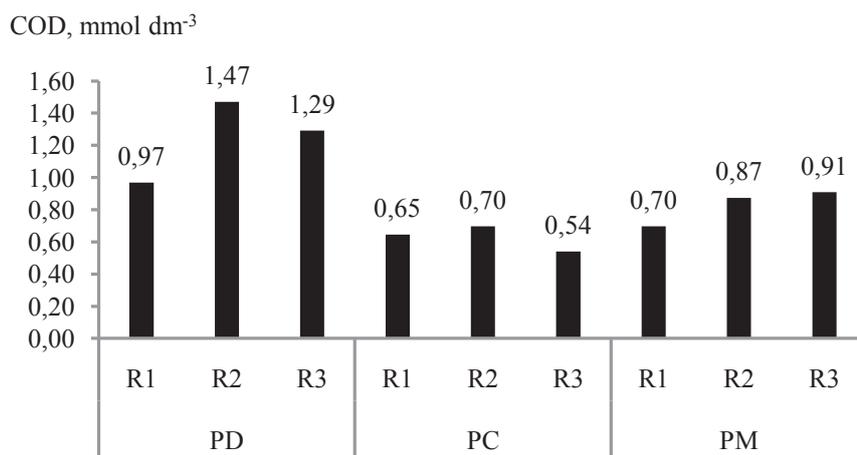
⁽¹⁾ as médias dos tratamentos, na respectiva camada, não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

Os elevados teores de P extraível nas camadas superficiais do PD e do PM não influenciaram os teores de P na solução do solo, conforme já havia constatado Zambrosi et al. (2008), ao relatarem que os teores das formas de P na solução do solo variam com o pH da solução, sendo que este último atributo não variou no presente estudo.

Os teores de COD na solução do solo foram maiores na camada superficial do PD, em relação ao PC e ao PM (Figura 14 e Tabela 37), sendo que na outra camada avaliada, este atributo também

foi maior no PD.

Os teores de COD, em função das rotações (Figura 14 e Tabela 37), foram inferiores aos da mata, porém, as rotações com mais de quatro espécies (R2 e R3) mostram, principalmente, no PD, maiores valores de COD, em comparação a rotação T/S (R1). As rotações R2 e R3 produzirem mais MS (item 4.3) e, portanto, contribuíram com maior teor de C para a solução (JANTÁLIA et al., 2006). Vieira et al. (2009) encontraram diferenças nos teores de COD, conforme o tipo de rotação de culturas, sendo maiores nas camadas de 0 a 5 cm das rotações com espécies leguminosas.



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 14. Valores do carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo da camada de 6,8 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Os valores obtidos foram maiores que os do presente estudo, entretanto, os autores usaram filtro de maior diâmetro de poros e somente uma filtragem quando da extração da solução, o que explica as diferenças (SILVA, 2001).

Tabela 37. Valores médios do carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|--|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | COD - Carbono orgânico dissolvido, mmol dm ⁻³ | | | | |
| PD | 1,93a | 15,8 | 1,24 | 13,6 | 3,50* |
| PC | 0,56b | 5,3 | 0,63 | 5,4 | 1,11 ^{ns} |
| PM | 0,95b | 6,7 | 0,83 | 6,3 | 1,69 ^{ns} |
| R1 | 0,90 | 8,1 | 0,79 | 6,1 | 0,92 ^{ns} |
| R2 | 1,11 | 7,6 | 0,82 | 5,9 | 1,70 ^{ns} |
| R3 | 1,42 | 9,0 | 1,09 | 7,5 | 1,39 ^{ns} |
| Mata | 2,15 | 21,6 | 2,66 | 10,6 | 1,24 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

O menor valor de COD na camada de 0 a 6,7 cm foi observado no PC. Possivelmente, isso é devido ao revolvimento do solo (MIRANDA et al., 2006). Os valores de COD encontrados nos manejos PD e PC foram semelhantes aos relatados por Salet et al. (1999), na mesma área experimental, em estudo efetuado 10 anos antes do presente trabalho, em experimento similar. Assim, pode-se inferir que não houve aumento do COD da solução do solo, após mais de uma década de manejo do solo com PD. Entretanto, no trabalho de

Salet (1998), o teor de MOS no PD, de ambas as camadas foi maior que o do PC e, também maiores que as observadas no presente estudo.

A rotação T/S/E/Sg/Ab/S (R3) produziu anualmente, maior teor de biomassa (item 4.3), o que pode ter resultado também em maior teor de COD na solução do solo desta camada. Além disso, esta rotação contém aveia branca e, de acordo com Cassolato et al. (2000), algumas cultivares dessa espécie exsudam no solo, substâncias que aumentam o pH e o teor de Ca trocável, diminuindo o teor de Al trocável, até 20 cm de profundidade.

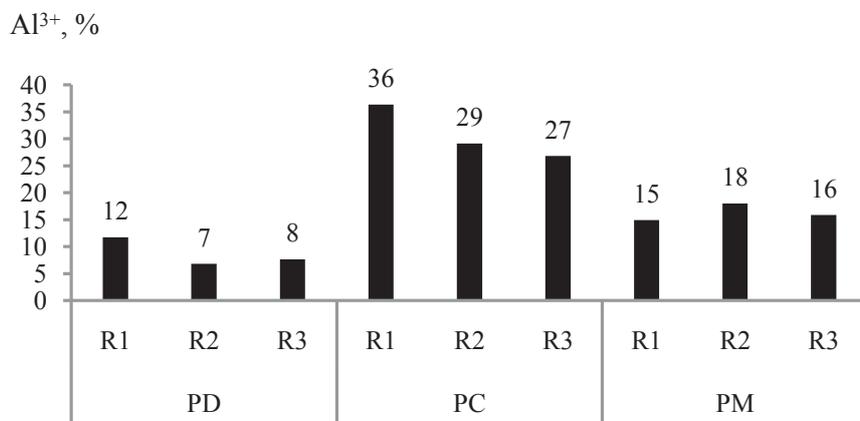
Quando se estimou a correlação entre os valores de C do solo e os teores de COD foi obtido um valor do coeficiente $r = 0,46^{***}$. O valor moderado desse coeficiente indica importante contribuição da MOS para os teores de C dissolvido na solução.

4.2.7 Especificação da solução do solo

Os valores de pH, da força iônica, do COD, dos cátions e de ânions da solução foram utilizados para estimar a especificação iônica, com o software MinteqA2 e avaliar da atividade do Al tóxico às plantas, na solução do solo.

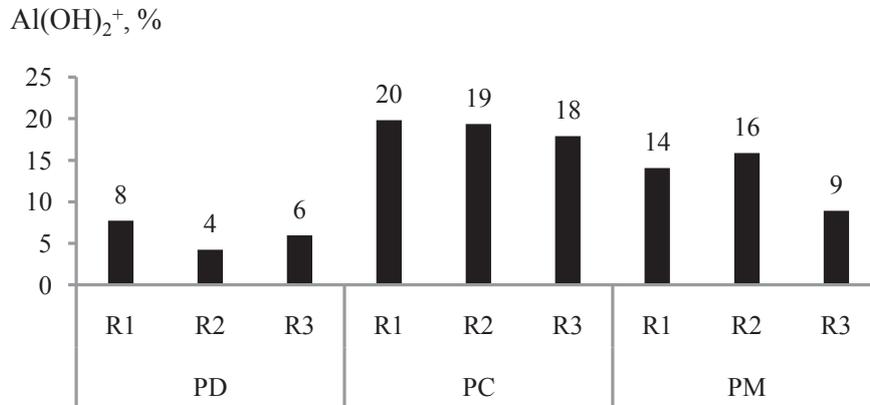
4.2.8 Atividade e complexação do alumínio

Os resultados da ANAVA dos valores dos percentuais e das atividades de diferentes espécies químicas de Al na solução do solo (Apêndice G), mostraram que, na camada de 0 a 6,7 cm, houve efeito da interação entre manejo de solo e rotação de culturas nas variáveis Al^{3+} e $Al(OH)_2^+$ (Figuras 15, 16, 17 e 18).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 15. Percentuais de Al^{3+} na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

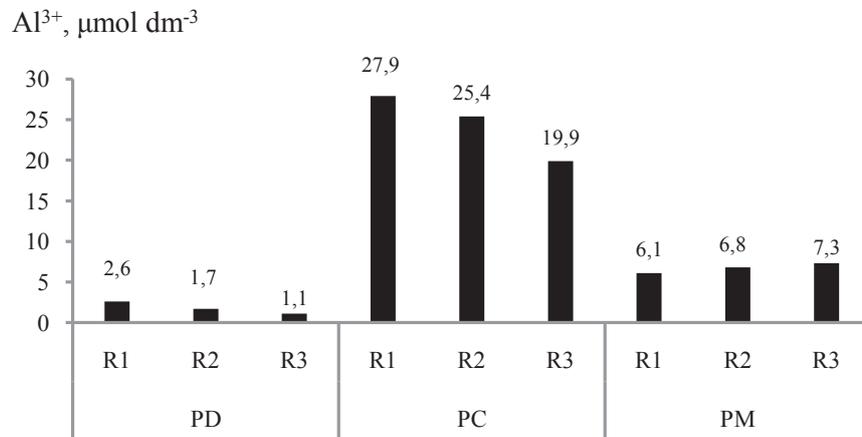


PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 16. Percentuais de Al(OH)₂⁺ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Os valores de Al³⁺ e de Al(OH)₂⁺, na camada de 0 a 6,7cm (Figuras 15, 16, 17 e 18), foram maiores nas rotações R1 (Al³⁺) e R1 e R2 (Al(OH)₂⁺), nos manejos PC e PM, indicando que a mobilização do solo alterou os percentuais e a atividade destas espécies tóxicas de Al, além do tipo de rotação de culturas.

Em geral, os percentuais de Al complexados com ligantes orgânicos foram maiores na mata e nas camadas dos manejos conservacionistas, em relação ao manejo PC.

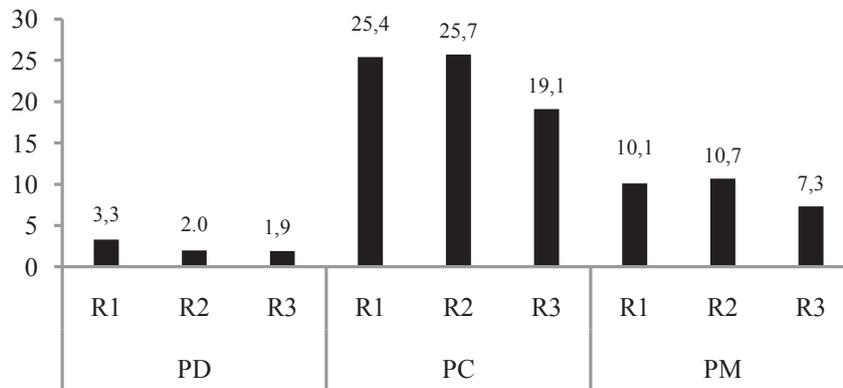


PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 17. Atividade de Al^{3+} na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

As porcentagens de Al tóxico, principalmente na forma de Al^{3+} , foram maiores nas camadas superficiais do manejo PC e menores no PD, concordando com as observações de Salet et al. (1999) e de Cambri (2004), embora estes autores avaliaram somente as camadas 0 a 5 e 5 a 15 cm de solo sob os manejos PC e PD.

Al(OH)_2^+ , $\mu\text{mol dm}^{-3}$



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 18. Atividade de Al(OH)_2^+ na solução do solo da camada de 0 a 6,7 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, submetida a três tipos de manejo, em função de três tipos de rotação de culturas.

Na camada de 0 a 6,7 cm, houve efeito isolado dos fatores manejo e rotação nos resultados de percentuais e atividades de Al^{3+} , AlOH^{2+} , Al(OH)_2^+ e no somatório das espécies de Al tóxico ($\text{Al}^{3+} + \text{AlOH}^{2+} + \text{Al(OH)}_2^+$) (Tabelas 38 e 40). O Al-DOM variou somente entre os tipos de manejo, na camada superficial (Tabelas 39 e 41).

Tabela 38. Valores de percentuais de formas de Al tóxico na solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|--------|--------------------------------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| | Al ³⁺ , % | | | | |
| PD | 8b | 7,9 | 11 | 8,2 | 0,78 ^{ns} |
| PC | 30a | 6,8 | 24 | 6,3 | 0,96 ^{ns} |
| PM | 16b | 5,4 | 23 | 13,3 | 5,99* |
| R1 | 21a | 7,3 | 18 | 6,8 | 0,67 ^{ns} |
| R2 | 22a | 8,6 | 18 | 7,9 | 0,73 ^{ns} |
| R3 | 13b | 8,5 | 22 | 7,4 | 3,42* |
| Mata | 13 | 11,1 | 11 | 13,2 | 0,44 ^{ns} |
| | AlOH ²⁺ , % | | | | |
| PD | 6c | 7,4 | 8 | 6,6 | 1,84 ^{ns} |
| PC | 19a | 6,2 | 18 | 10,0 | 0,63 ^{ns} |
| PM | 13b | 6,4 | 15 | 16,6 | 0,98 ^{ns} |
| R1 | 15a | 7,3 | 15 | 6,5 | 0,35 ^{ns} |
| R2 | 12b | 7,1 | 13 | 6,8 | 0,88 ^{ns} |
| R3 | 11b | 8,9 | 13 | 7,3 | 1,66 ^{ns} |
| Mata | 8 | 16,3 | 7 | 14,8 | 1,08 ^{ns} |
| | Al(OH) ₂ ⁺ , % | | | | |
| PD | 3b | 7,8 | 4 | 6,7 | 4,44* |
| PC | 8a | 7,2 | 9 | 7,1 | 0,39 ^{ns} |
| PM | 7a | 9,1 | 6 | 7,6 | 0,98 ^{ns} |
| R1 | 8a | 7,2 | 8 | 7,4 | 0,16 ^{ns} |
| R2 | 6ab | 5,2 | 7 | 8,5 | 1,36 ^{ns} |
| R3 | 5b | 10,0 | 5 | 8,0 | 0,81 ^{ns} |
| Mata | 3 | 22,7 | 2 | 17,7 | 1,58 ^{ns} |
| | Σ Al tóxico, % | | | | |
| PD | 18c | 7,4 | 44 | 6,9 | 1,44 ^{ns} |
| PC | 58a | 13,7 | 52 | 11,3 | 1,23 ^{ns} |
| PM | 37b | 5,7 | 23 | 7,7 | 1,80 ^{ns} |
| R1 | 45a | 7,3 | 41 | 6,4 | 0,91 ^{ns} |
| R2 | 39a | 7,7 | 38 | 6,8 | 0,04 ^{ns} |
| R3 | 29b | 8,6 | 40 | 7,2 | 3,11* |
| Mata | 24 | 12,5 | 19 | 16,4 | 0,83 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

Em geral, os percentuais de Al complexados com ligantes orgânicos foram maiores na mata e nas camadas dos manejos conservacionistas, em relação ao manejo PC (Tabela 39).

Os resultados mostrados na Tabela 39 indicaram que a maior parte do Al solúvel no PM e no PD encontrava-se complexado com compostos orgânicos. Embora houvesse uma tendência de que esta espécie de Al aumente com a profundidade do solo, as diferenças não foram confirmadas pelo teste t. Como consequência, nestes manejos, a solução do solo contém, na camada de 0 a 6,7 cm, menor percentual de espécies tóxicas de alumínio, em relação ao PC (Tabela 39).

Tabela 39. Valores de percentuais Al-DOM na solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|-------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Al-DOM, % | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 39b | 7,7 | 56 | 6,1 | 2,21 ^{ns} |
| PC | 29c | 5,9 | 40 | 5,5 | 0,66 ^{ns} |
| PM | 43a | 12,7 | 33 | 7,2 | 1,62 ^{ns} |
| Rotações ⁽²⁾ | 37 | 9,0 | 43 | 8,9 | 1,61 ^{ns} |
| Mata | 65 | 5,2 | 76 | 3,3 | 1,41 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

As atividades das formas de Al tóxico refletiram os efeitos dos percentuais e atividades de Al tóxico e de Al-DOM (Tabelas 40 e 41). Os mesmos efeitos da interação entre manejo e rotações podem

ser observados nas Figuras 17 e 18, com mais intensidade no manejo PC. A atividade do Al, portanto, foi menor nas camadas superficiais dos manejos conservacionistas e na segunda camada do PD, em relação ao PC. Constatações semelhantes foram obtidas por Salet (1998) e por Zambrosi (2004).

Os valores do pH da solução do solo do presente estudo foram cerca de 5,1, e que, de acordo com Kinraide (1991), é o valor no qual as três mais importantes formas tóxicas do Al, em condição de acidez, principalmente o $AlOH^{+2}$ e o $Al(OH)_2^+$ atingem elevados valores relativos de atividade.

Salet (1998), Salet et al. (1999) e Cambri (2004) estudaram o efeito da complexação do Al pelo COD, estimado por programas de especiação química, nas camadas 0 a 5 cm e 5 a 10 cm, em um Latossolo Vermelho distrófico de Passo Fundo, sob PD e PC, cuja calagem ocorrera há menos de dez anos. Esse estudo mostrou que a maior parte do Al solúvel no PD se encontrava complexado com COD, diferentemente do verificado no PC. Esta observação foi aprofundada neste trabalho, uma vez que a dinâmica do C no solo depende do tempo de cultivo e varia com o tipo de manejo de solo e rotações de culturas (CAMBRI, 2004; JANTÁLIA et al., 2006; VIEIRA et al., 2009).

A comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por Salet (1998), Salet et al. (1999), Cambri (2004) e Vieira et al. (2009) mostra que, após 21 ou 22 anos sem calagem, os resultados foram de magnitudes diferentes, mas com tendência semelhante.

Tabela 40. Valores da atividade de formas de Al tóxico na solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|---|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Al^{3+} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | | |
| PD | 1,8b | 9,4 | 6,7b | 10,6 | 1,80 ^{ns} |
| PC | 24,3a | 8,2 | 18,2a | 9,2 | 0,60 ^{ns} |
| PM | 6,5b | 5,3 | 21,2a | 7,5 | 4,07* |
| R1 | 14,0a | 11,0 | 12,2b | 8,1 | 0,30 ^{ns} |
| R2 | 13,7a | 10,9 | 11,8b | 9,8 | 0,26 ^{ns} |
| R3 | 5,0b | 9,4 | 22,0a | 9,0 | 2,99* |
| Mata | 15,3 | 7,1 | 16,3 | 10,6 | 0,45 ^{ns} |
| $AlOH^{2+}$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | | |
| PD | 2,5b | 8,6 | 7,2b | 10,1 | 1,75 ^{ns} |
| PC | 23,3a | 6,7 | 20,5a | 7,7 | 0,42 ^{ns} |
| PM | 9,3b | 6,0 | 19,2a | 5,3 | 4,27* |
| R1 | 15,5a | 9,6 | 14,8ab | 7,5 | 0,16 ^{ns} |
| R2 | 12,2ab | 10,0 | 12,2a | 8,9 | 0,01 ^{ns} |
| R3 | 7,5b | 9,8 | 19,8a | 8,4 | 3,24* |
| Mata | 14,8 | 13,2 | 12,4 | 12,0 | 1,09 ^{ns} |
| $Al(OH)_2^+$, $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | | |
| PD | 1,7c | 8,3 | 3,8b | 9,1 | 1,96 ^{ns} |
| PC | 12,2a | 4,6 | 12,3a | 6,0 | 0,14 ^{ns} |
| PM | 7,2b | 8,4 | 9,3a | 5,0 | 1,30 ^{ns} |
| R1 | 9,3a | 8,5 | 9,3 | 7,7 | 0,01 ^{ns} |
| R2 | 5,8b | 8,7 | 7,0 | 8,2 | 1,00 ^{ns} |
| R3 | 5,8b | 10,4 | 9,2 | 8,2 | 2,45 ^{ns} |
| Mata | 7,2 | 20,3 | 5,2 | 14,4 | 1,58 ^{ns} |
| Σ Al tóxico, $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | | |
| PD | 5,8b | 8,6 | 17,5b | 10,1 | 1,76 ^{ns} |
| PC | 60,3a | 6,8 | 51,2a | 7,8 | 0,51 ^{ns} |
| PM | 23,3b | 6,1 | 49,5a | 5,9 | 3,79* |
| R1 | 38,8a | 9,7 | 36,3 | 7,5 | 0,24 ^{ns} |
| R2 | 32,2ab | 10,2 | 30,8 | 8,9 | 0,10 ^{ns} |
| R3 | 18,5b | 9,7 | 51,0 | 8,5 | 3,15* |
| Mata | 37,3 | 11,7 | 33,9 | 14,0 | 0,65 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja; * indica diferença entre as camadas pelo teste t pareado. ^{ns} = não houve diferença significativa entre as camadas.

No presente trabalho, observou-se correlação inversa moderada entre atividade do Al^{3+} e o teor de COD, na camada superficial, assim como observaram Salet et al. (1999), Cambri (2004) e Vieira et al. (2009). Na camada subsuperficial, obteve-se maior porcentagem de Al tóxico na solução e maior variação dos teores de COD entre os tipos de manejo, mas não foram constatadas correlações significativas entre estes atributos (Tabelas 42). Houve, porém, correlação inversa entre o COD e o somatório das espécies tóxicas de Al, nesta última camada.

Tabela 41. Valores da atividade do Al-DOM na solução do solo de duas camadas de Latossolo Vermelho distrófico submetidas a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Médias | Camada, cm | | | | Valor de t |
|---------------------------------|------------|---------|----------|---------|--------------------|
| | 0 – 6,7 | C.V., % | 6,8 - 20 | C.V., % | |
| Al-DOM, $\mu\text{mol dm}^{-3}$ | | | | | |
| PD ⁽¹⁾ | 27,8b | 6,8 | 64,5 | 9,3 | 1,65 ^{ns} |
| PC | 50,6a | 5,3 | 50,2 | 5,9 | 0,05 ^{ns} |
| PM | 50,0a | 5,5 | 76,2 | 6,3 | 3,02* |
| Rotações ⁽²⁾ | 42,8 | 6,5 | 63,6 | 8,0 | 2,35* |
| Mata | 187,0 | 6,1 | 234,1 | 6,4 | 1,10 ^{ns} |

PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes; ⁽¹⁾ as médias dos manejos, na respectiva camada, diferiram entre si, e ⁽²⁾ as médias das rotações não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste Tukey; * houve diferença entre as camadas; ^{ns} = não houve diferença entre as camadas.

4.2.9 Correlações entre atributos químicos do solo

A correlação entre atributos químicos do solo, relacionados com a toxidez do Al mostrou que, o COD da solução do solo aumenta com o acréscimo do teor de MO do solo. Isso indica que

o aumento da matéria orgânica contribui para reduzir os efeitos do Al tóxico às plantas, conforme observado por Zambrosi (2004). Os resultados da Tabela 42 também mostram que o único atributo com o qual a atividade do Al^{3+} teve muito fraca correlação foi o teor de argila do solo, porém, isto é explicado pela pouca variação dos valores do teor de argila.

Tabela 42. Correlações (Pearson) entre atributos químicos da solução de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Variáveis correlacionadas | Correlação (r) | P (r = 0) | Amostras correlacionadas n |
|----------------------------------|----------------|-----------|----------------------------|
| COD e Al^{3+} | -0,42 | 0,0015 | n = 60 |
| COD e Al^{3+} (0 a 6,7 cm) | -0,61 | 0,0073 | n = 20 |
| COD e Σ de Al tóxico | -0,73 | <0,0001 | n = 60 |
| COD e MO | 0,39 | 0,0020 | n = 60 |
| Al^{3+} e Al^{3+} (sol) | 0,76 | <0,0001 | n = 60 |
| Σ de Al tóxico e MOP | -0,41 | 0,0010 | n = 60 |
| Al^{3+} (sol) e Al^{3+} solo | 0,39 | 0,0024 | n = 60 |

COD = carbono orgânico dissolvido; MOP = matéria orgânica particulada; MO = matéria orgânica do solo; sol = solução do solo.

4.2.10 Correlações entre atributos físicos e químicos do solo

No presente estudo, foram feitas também correlações entre atributos físicos e químicos. Poucos estudos sobre as características químicas e físicas do solo sob diferentes tipos de manejo são relatados na literatura científica e nestes não se procurou estabelecer correlação entre estes atributos (SANTOS, 1997; TORMENA et al., 1998; SILVA

e ROSOLEM, 2001; OLIVEIRA et al., 2004).

A Tabela 43 mostra os resultados destas correlações cujos coeficientes r foram altos. Constatou-se que os atributos correlacionados foram a dispersão de argilas e a adsorção de nutrientes (ADA e K), e a concentração de acidez em solos compactados (Al e RP, H + Al e RP).

Tabela 43. Correlações (Pearson) entre os atributos físicos e os químicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas

| Variáveis correlacionadas | Correlação (r) | P (r = 0) | Amostras correlacionadas |
|---------------------------|----------------|-----------|--------------------------|
| ADA e m (%) | 0,45 | <0,0001 | n = 60 |
| ADA e P | -0,58 | <0,0001 | n = 60 |
| ADA e K | -0,67 | <0,0001 | n = 60 |
| Al e RP 0,01 kPa | 0,45 | <0,0001 | n = 60 |
| Al e RP 0,5 kPa | 0,42 | <0,0001 | n = 60 |
| H + Al e RP 0,01 kPa | 0,45 | <0,0001 | n = 60 |
| H + Al e RP 0,3 kPa | 0,44 | <0,0001 | n = 60 |

MOS = matéria orgânica do solo; ADA = argila dispersa em água; RP = resistência à penetração.

4.3. Produção das culturas

É comum nas culturas de trigo, soja, milho, sorgo e aveia branca grande variação no valor de rendimentos de grãos. Isto se deve a muitos fatores, mas as condições climáticas que ocorreram em cada ano, ou período, podem ser consideradas determinantes.

As condições mais favoráveis, para cada espécie, de temperatura, de disponibilidade de luz solar, de precipitação pluvial (DALMAGO et al., 2008) e ausência de eventos acidentais, como geadas e chuvas na colheita (MOTA, 1998), são fatores importantes para a obtenção de rendimentos elevados.

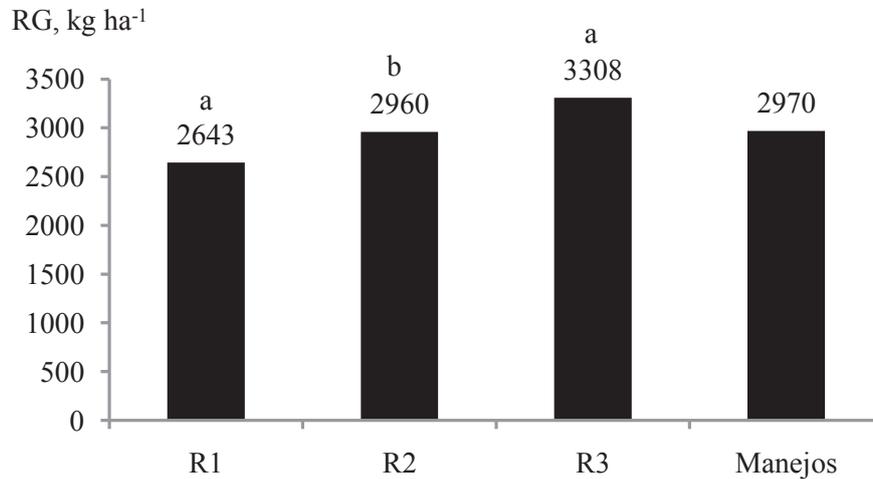
4.3.1 Rendimento das culturas de trigo e aveia branca

No presente trabalho, foi comparado o rendimento de grãos de trigo da safra 2007/2008.

A análise de variância do rendimento de grãos de trigo mostrou que não houve interação entre os fatores tipo de manejo e rotação de culturas. Esta análise também mostrou que houve efeito simples do fator rotação de culturas (Apêndice H).

Os rendimentos de grãos médios de trigo (2.970 kg ha^{-1} , C.V. = 11,7%), foram menores que os valores potenciais máximos de rendimento esperados na região, que podem atingir de 6.000 a 7.000 kg ha^{-1} no sul do Brasil (PIRES et al., 2005), mas maiores que a média das lavouras (2.030 kg ha^{-1}), colhidas no ano do experimento.

As médias do rendimento de grãos do trigo da rotação de culturas T/S/E/M/Ab/S foram maiores que a de T/S/E/M, e as desta foram maiores do que as da sucessão de culturas T/S. Os tipos de manejo não diferiram entre si (Figura 19).



R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja.

Figura 19. Rendimentos de grãos (RG) de trigo de um Latossolo Vermelho, em função de rotações de culturas (média dos manejos de solo).

Na rotação R3, o trigo é cultivado a cada três anos. Assim, a incidência de moléstias fitopatológicas, fúngicas principalmente, é menor, devido à menor intensidade de propagação de patógenos, o que confere, portanto, maior rendimento à cultura (PRESTES et al., 2002).

Como a cultura de trigo foi submetida às mesmas condições de clima, de adubação e de tratamentos fitossanitários em cada ano, a ANAVA indicou que o tipo de manejo de solo influencia o rendimento de grãos de trigo, mas este efeito depende da rotação de cultura. As rotações nas quais a cultura do trigo é alternada a cada dois ou três anos mostraram maior rendimento de grãos, em função da redução de inóculo, ainda que, Franchini et al. (2000); Oliveira et al.,

(2002) e Santos et al. (2006a) relacionem estas diferenças com os atributos químicos do solo e, Müller et al. (2001) com os atributos físicas.

Os resultados de análise de variância do rendimento de grãos de aveia branca não mostraram diferenças entre os tipos de manejos. A aveia branca é componente de somente uma seqüência de rotação (R3). A média de rendimento de grãos foi de 2.992 kg ha⁻¹ (CV = 5,4%).

A influência do clima como único condicionante do rendimento de grãos de trigo e de aveia branca na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, pode ser contestada pela relação entre o rendimento de grãos e o índice pluviométrico no período, cujos valores foram normais (Cunha, G.R. Informações meteorológicas de Passo Fundo, RS: 2008 – Embrapa Trigo). De acordo com Cunha et al. (2002), a quantidade das chuvas no período anterior e durante a colheita é determinante na qualidade do produto e, conseqüentemente, no rendimento de grãos.

Geadas causam prejuízos elevados a lavouras de trigo, entretanto, o dano causado pela geada é localizado, de curta abrangência e dependente de vários outros fatores, raramente afetando uma grande área de ocorrência. As geadas freqüentemente causam reduções de rendimento de grãos em trigo, mas dependem da área total de ocorrência, do estágio fenológico de desenvolvimento das plantas atingidas por ocasião da ocorrência da geada (SZÚCS et al., 2003), ainda que a influência negativa da geada sobre os genótipos de trigo brasileiros seja pouco conhecida (SILVA et al., 2008).

A redução da disponibilidade hídrica do solo reduz as

perdas de rendimento de grãos pela geada, se ocorrer durante o espigamento do trigo (RODRIGUES et al., 1998; SILVA et al., 2008), sendo esta uma das razões de fraca correlação com o evento climático geada. Assim, de um modo geral, a geada, mesmo em período crítico de sensibilidade da cultura do trigo, não aparenta ser o maior causador de redução no rendimento de trigo ou de aveia branca.

Considerando-se o efeito da fitossanidade no rendimento de grãos de culturas de inverno, Santos e Reis (2003) destacam a importância das rotações de culturas, principalmente em estabelecer seqüências de culturas nas quais o trigo seja inserido a cada três anos com o objetivo de reduzir o potencial de inóculo das moléstias mais problemáticas à cultura.

4.3.2 Rendimentos de grãos de soja e sorgo

O resultado da análise de variância de rendimento de grãos de soja, na safra avaliada, não indicou interações entre os fatores, nem efeito isolado (Apêndice H). O rendimento de grãos médio dos tratamentos foi de 2.440 kg ha⁻¹ (CV = 18,4%).

Os rendimentos de grãos de soja foram suficientes para cobrir os custos de produção, definidos por Minetto (2009) como o equivalente a 1.854 kg ha⁻¹.

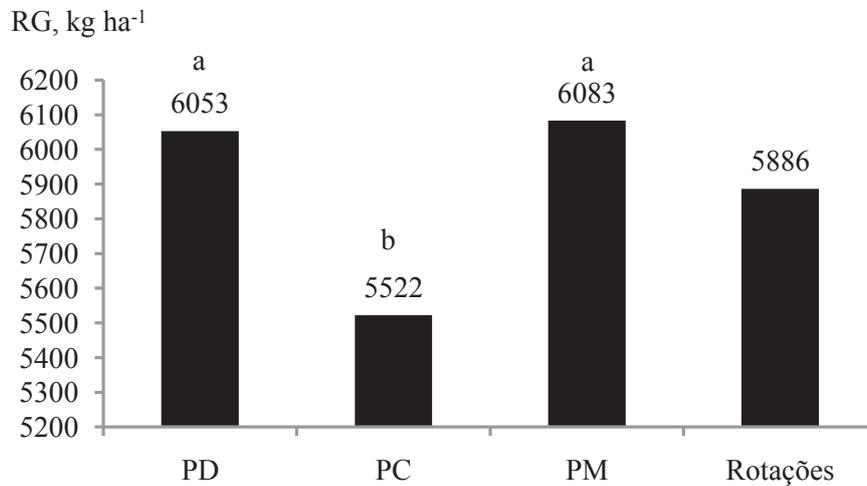
Em culturas de verão os valores potenciais de rendimento de grãos também dependem dos componentes fenológicos determinantes do rendimento de grãos, como, por exemplo, a expressão destes componentes, que são governados pela temperatura, umidade do ar e do solo, luminosidade e disponibilidade de água no solo (CALVIÑO e SADRAS, 1999; FLOSS, 2006), fatores climáticos

estes que variam muito de um ano para outro. Entretanto, Richter e Richter (2009) analisaram históricos de precipitação pluvial no Planalto Médio do RS e não verificaram correlações significativas entre rendimento de grãos de soja e índices pluviométricos acumulados, e mesmo nas condições mais favoráveis de oferta hídrica, a correlação foi de cerca de 20% (muito fraca).

De acordo com Matzenauer et al. (2003), é freqüente a ocorrência de deficiência hídrica durante o período crítico da soja e grandes reduções nos rendimentos de grãos de soja são esperadas no Rio Grande do Sul, em nove a cada vinte safras. Na soja a falta de água é o principal causa do abortamento de flores (BERGAMIN et al., 1999), um importante causa de redução de rendimento de grãos em verões quentes e secos. É por esse motivo que existem indicações técnicas para o escalonamento da data de semeadura visando evitar prejuízos ao produtor (MATZENAUER et al., 2003).

Spera et al. (2004) não observaram diferenças nos rendimento de grãos de soja cultivada com três tipos de manejo. Ao correlacionarem rendimento de grãos com os atributos físicos de solo, estes autores também não observaram relações entre os atributos densidade, porosidade total e macroporosidade e atribuíram as variações, às deficiências nutricionais do solo.

Os rendimentos de grãos de sorgo ($CV = 12,5\%$) foram diferentes entre os tipos de manejo, porém não houve interação entre os fatores (Figura 20).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes

Figura 20. Rendimento de grãos de sorgo de um Latossolo Vermelho, em função dos tipos de manejo (médias das rotações de culturas).

O potencial de rendimento de grãos de sorgo, normalmente, pode ultrapassar as 10 t ha⁻¹, em condições favoráveis, como as que ocorrem com certa frequência no verão do Rio Grande do Sul (MELLO et al., 2007), ainda que a cultura requiera menos água para se desenvolver, quando comparado com outros cereais, sendo que o período mais crítico de falta de água é o florescimento. Essa cultura produz mais que o milho quando sob estresse hídrico e é capaz de se recuperar de murchas prolongadas (AMARAL et al., 2003).

No Brasil, o sorgo é cultivado em condições climáticas geralmente desfavoráveis (safrinhas). Em consequência, a produtividade é baixa, com tendência a oscilações anuais que refletem

as condições anuais de clima. No presente estudo, o sorgo foi cultivado sob condições climáticas típicas de safra de verão, com ocorrências de veranicos, o que explica as diferenças de rendimento de grãos entre os anos.

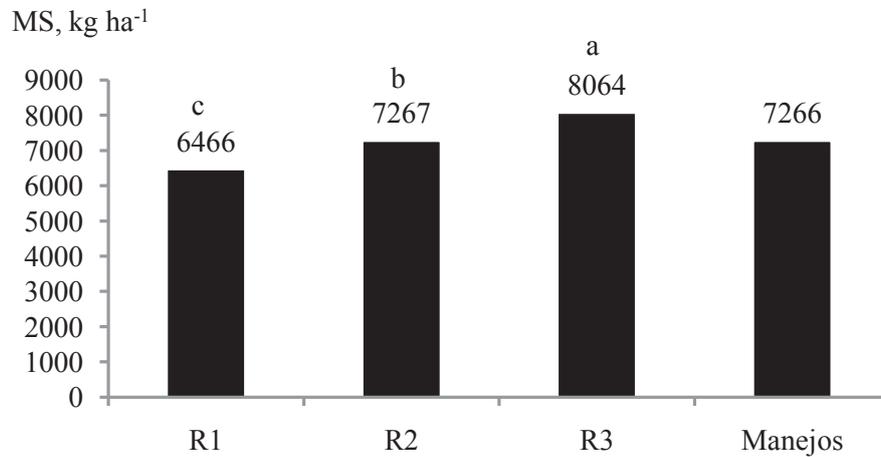
Normalmente, o sorgo é a cultura com menor oscilação nos rendimento de grãos entre os anos, ainda que o potencial de rendimento do sorgo seja inferior ao do milho. Em anos mais secos foram obtidos maiores rendimentos de grãos, pois as características do sorgo permitem o desenvolvimento satisfatório em condições de déficits hídricos medianos (RODRIGUES e SANTOS, 2007).

4.3.3 Produção de massa de matéria seca

4.3.3.1 Produção de massa de matéria seca de culturas de inverno

A produção de massa de matéria seca das culturas de inverno variou em um mesmo ano, pois as diferentes culturas têm exigências e períodos de ocorrência de fatores climáticos, como temperatura, luminosidade e precipitação pluvial, que variam entre as espécies vegetais (FLOSS, 2006).

Os resultados da análise de variância da massa de matéria seca de trigo indicaram que esta variável variou somente com a rotação de culturas (Figura 21). As rotações com mais de uma espécie componente apresentaram maiores quantidades de massa de matéria seca que a rotação T/S (R1).



R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja

Figura 21. Quantidade de massa de matéria seca da parte aérea (MS) de trigo de um Latossolo Vermelho, em função de rotações de culturas (médias dos manejos).

A rotação de culturas T/S/E/Sg/Ab/S (R3), que proporcionou maior rendimento de grãos, também proporcionou, junto com a rotação T/S/E/Sg, maior valor de massa de matéria seca na cultura do trigo. Santos et al. (1996; 2003 e 2006a) reportam que, tanto a produção de massa de matéria seca, como o rendimento de grãos de trigo, são favorecidas por estratégias de rotação de culturas que contemplam várias espécies, e que nas quais, o trigo deva ser cultivado com um intervalo de pelo menos um ano entre as safras, para permitir a redução no potencial de inóculo das principais moléstias que incidem sobre a cultura.

A cultura da aveia branca, incluída em somente um modelo de rotação de culturas, não apresentou diferença de produção

média de massa de matéria seca da safra avaliada dentro do fator tipos de manejo. A quantidade média de massa de matéria seca foi de 8.613 kg ha⁻¹ (CV = 16,0%).

A ANAVA dos resultados de produção média anual de massa de matéria seca da ervilhaca não mostrou interação entre os fatores, nem efeitos isolados destes. A quantidade de massa de matéria seca foi de 2.657 kg ha⁻¹. Neste trabalho, a ervilhaca foi incluída nas rotações T/S/E/Sg e T/S/E/Sg/Ab/S, sendo destinada à adubação verde e cobertura do solo, durante o inverno. Como esta espécie fixa nitrogênio da atmosfera (BARNI et al., 2003), ela pode interferir no desenvolvimento da cultura posterior, que nas rotações testadas neste trabalho foi o sorgo.

De acordo com Giacomini et al. (2003), a ervilhaca tem sido uma importante cultura de adubação verde no Rio Grande do Sul, e se destaca pela elevada capacidade de acumular nitrogênio nos tecidos (cerca de 20 kg t⁻¹ de massa de matéria seca). Porém, esta espécie não se destaca pela elevada produção de massa de matéria seca, ainda que, entre as espécies leguminosas de inverno, seja uma das que apresenta maior produção de massa da matéria seca, atingindo valores acima de 3,0 t ha⁻¹ (BARNI et al., 2003).

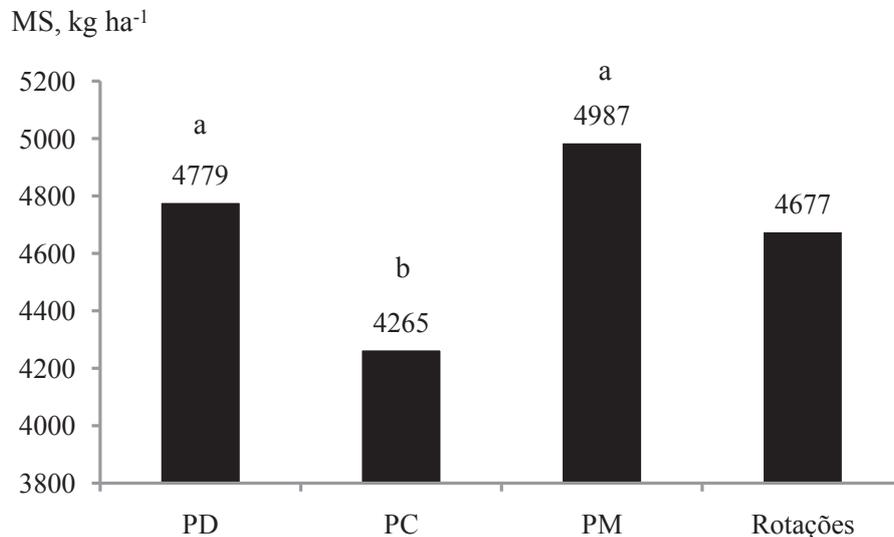
Ainda que os fatores climáticos sejam um dos responsáveis pelo acúmulo de matéria seca em culturas de inverno, em trigo e aveia branca na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, os índices pluviométricos não têm relação com a produção de massa de matéria seca. Uma das principais razões é o fato do inverno na região temperada do sul do Brasil normalmente ser chuvoso (MATZENAUER et al., 2007). Nessa condição de regime pluvial, a

quantidade de dias de insolação plena seria mais importante na determinação do crescimento vegetal, em razão da eficiência fotossintética, do que a quantidade de chuvas (CUNHA et al., 2002).

4.3.3.2 Produção de massa de matéria seca de soja e sorgo

Os resultados das culturas de verão indicam que a produção de massa de matéria seca das culturas também varia em um mesmo ano, pois, assim como nas culturas de inverno, as culturas de verão apresentam diferentes exigências e períodos de ocorrência de fatores climáticos, como temperatura, luminosidade e precipitação pluvial que variam a cada ano (FLOSS, 2006).

A quantidade avaliada de massa de matéria seca da parte aérea da cultura da soja variou com o tipo de manejo, não havendo interação entre os fatores estudados (Figura 22). As maiores produções de massa de matéria seca da parte aérea de soja foram observadas no PD e, as menores produções, no PC.



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes

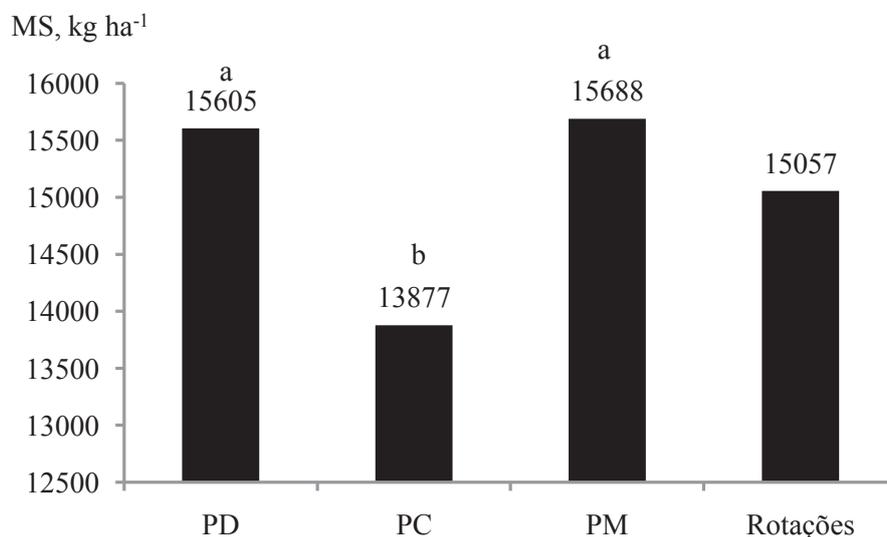
Figura 22. Quantidade de massa de matéria seca da parte aérea (MS) de soja de um Latossolo Vermelho, em função dos manejos de solo (médias das rotações de culturas).

A quantidade de massa de matéria seca da parte aérea da cultura do sorgo, que foi incluída na rotação em substituição ao milho, variou com os tipos de manejo do solo, porém, não houve interações entre os fatores (Figura 23). As maiores produções de massa de matéria seca da parte aérea do sorgo foram observadas no PM e no PD.

Mello et al. (2007) afirmam que a produção da cultura do sorgo por ser bem tolerante aos estresses ambientais, tem maior estabilidade dentro de um mesmo agroecossistema.

A produção de massa de matéria seca de culturas é

dependente dos fatores ambientais, entre eles, a disponibilidade de água (FLOSS, 2006). O regime de precipitação pluvial do Rio Grande do Sul apresenta, na maioria das safras, condições ideais para o crescimento de culturas de verão. Entretanto, anos com distribuição inadequada de precipitações pluviais durante o verão, podem ocorrer e induzem, às vezes, elevadas perdas de produtividade das culturas (CUNHA et al., 1998).



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes

Figura 23. Quantidade de massa de matéria seca da parte aérea (MS) de sorgo de um Latossolo Vermelho, em função dos manejos de solo (média das rotações de culturas).

Valores baixos de índices pluviométricos podem ter relação com a redução na produção de massa de matéria seca nas culturas de verão, entretanto, valores maiores que o mínimo exigido

para estas culturas são os mais freqüentes e apresentam grande variabilidade. Por outro lado, o excedente de precipitação pluvial não proporcionou maior produção de massa de matéria seca, que também foi observado com os rendimentos de grãos. Este último aspecto pode explicar a pouca relação direta entre o volume pluvial e a produção de massa de matéria seca e do rendimento de grãos das culturas avaliadas neste trabalho.

As variações no conteúdo de massa de matéria seca encontradas entre os anos avaliados podem ter como causa os mesmos fatores ambientais que determinaram diferenças nos rendimentos de grãos. Assim, tal qual o ocorre com o rendimento de grãos, condições climáticas que ocorrem em cada safra, governam a produção de massa da matéria seca. Esses fatores climáticos são: a temperatura, precipitação pluvial e disponibilidade de luz solar e de água no solo (FLOSS, 2006; DALMAGO et al., 2008).

A produção da massa de matéria seca é um dos indicadores de crescimento e desenvolvimento de culturas mais utilizado e tem como objetivo, prever a produção, em termos de rendimento de grãos, forragem, massa de cobertura do solo, entre outros (LARCHER, 2000; FLOSS et al., 2004).

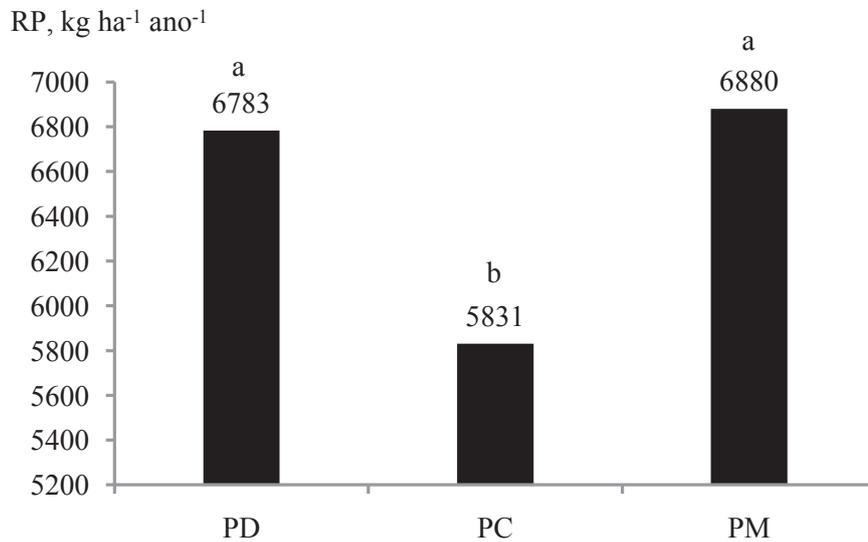
Os eventos climáticos acidentais: geadas e chuvas na colheita, para os cereais de inverno, e secas e ondas de calor, para as culturas de verão (TAIZ e ZEIGER, 2006) são fatores que afetam a produção da massa de matéria seca das culturas. O acúmulo de massa de matéria seca em todas as culturas, em condições normais de clima e os tratos culturais, apresenta forte correlação com o rendimento de grãos (FLOSS, 2006).

4.3.4 Rendimento de palha das rotações de culturas

Um dos mais importantes aspectos do manejo de solo e da rotação de culturas, em se tratando dos sistemas de manejo conservacionistas, é a produção de massa de matéria seca da parte aérea que é o fator principal para a formação da cobertura do solo com palha. Os resultados da análise de variância (Apêndice H) mostraram efeitos isolados do tipo de manejo de solo. Os sistemas conservacionistas PD e PM propiciaram maior produção de massa de matéria seca da parte aérea (CV = 18,1%), sendo respectivamente 6.783 e 6.880 kg ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto que o preparo com revolvimento (PC) gerou, em média, 5.831 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 24), embora neste tipo de manejo, a massa de matéria seca da parte aérea foi, quase que totalmente, incorporada ao solo.

A formação de palha para a cobertura de solo é resultado direto da quantidade de matéria seca da parte aérea disponível nos sistemas conservacionistas. Saraiva e Torres (1993) relatam que há forte correlação ($R^2 = 0,99$) entre as quantidades produzidas de resíduos culturais de trigo, soja e milho e a porcentagem de cobertura do solo.

A produção de resíduos culturais também teve relação com o teor de MO do solo, mas somente nas camadas de 0 a 6,7 cm do PD. Sisti et al. (2004) já haviam observado esta tendência, na camada de 0 a 10 cm, neste mesmo experimento, ao estudarem acúmulo de N e de C no solo e constatarem maior acúmulo de C no PD.



PD = plantio direto; PC = preparo convencional com arados e grades; PM = preparo com escarificador de hastes

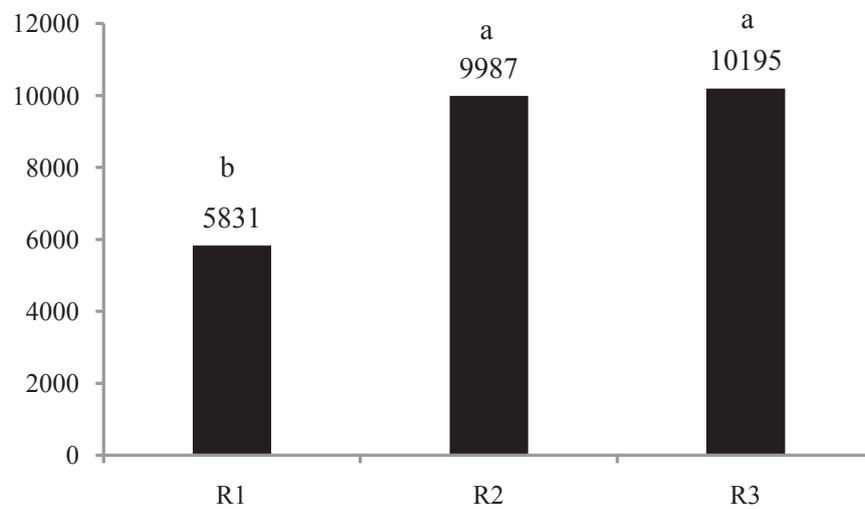
Figura 24. Produção média anual de palha (RP), em um Latossolo Vermelho, em função dos tipos de manejo de solo.

Os resultados da ANAVA (Apêndice H) também mostraram que a produção média anual de palha variou com a seqüência de rotação de culturas (Figura 25). A maior produção de resíduos culturais (CV = 17,3%) foi proporcionada pela rotação tri anual T/S/E/Sg/Ab/S (R3) (10.195 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e, em seguida, a rotação bianual T/S/E/Sg (R2) (9.987 kg ha⁻¹ ano⁻¹), enquanto que a menor produção foi obtida com a sucessão anual de T/S (R1) (5.831 kg ha⁻¹ ano⁻¹).

Do ponto de vista conservacionista, as seqüências de culturas de uma rotação devem fornecer ao solo, quando manejado com o PD, no mínimo 5,36 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C ao solo, para manter

estável o teor de matéria orgânica, contra $8,35 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C nos tipos de manejo de solo com revolvimento do solo com arados ou grades (ZANATTA et al., 2005), valores estes que são próximos àqueles referidos por Aita e Giacomini (2006). Neste estudo, a rotação de culturas R3 seria a única a atender tal demanda de C.

RP, $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$



R1 = trigo/soja; R2 = trigo/soja e ervilhaca/sorgo; R3 = trigo/soja, ervilhaca/sorgo e aveia branca/soja

Figura 25. Rendimento de palha (RP), de três seqüências de rotação de culturas em um Latossolo Vermelho.

Por outro lado, Saraiva e Torres (1993) relatam que em lavouras submetidas ao PD no norte do Paraná obtiveram 100% de cobertura do solo com palha, com 6.125 kg ha^{-1} de massa de matéria seca de soja, com 6.700 kg ha^{-1} de massa de matéria seca do milho e com 2.625 kg ha^{-1} de massa de matéria seca de trigo, porém, destacam que a cobertura do trigo é mais eficiente por persistir durante toda a

safra. Assim, as quantidades de massa de matéria seca da parte aérea produzidas pelos arranjos de rotação ou de sucessão de culturas, encontradas no presente estudo, podem ser suficientes para atenderem a demanda de palha para cobertura do solo.

4.3.5 Correlações entre atributos do solo e o rendimento de culturas

Os resultados dos atributos físicos e químicos do solo e os da solução do solo foram correlacionados com os rendimentos das culturas, para avaliar o grau de associação destas variáveis.

Na Tabela 44 constam os valores do coeficiente de correlação entre os atributos e os rendimentos, cujos valores de r foram fortes. Os atributos de solo com caráter restritivo ao desenvolvimento vegetal (Al, atividade do Al e resistência do solo à penetração) se correlacionaram de forma forte e inversa com o rendimento de grãos, conforme observaram Vieira et al. (2009), enquanto que aqueles considerados favoráveis (MOP, P, Mn e Al-DOM) se correlacionaram de forma positiva com o rendimento. Entretanto, entre os atributos analisados, poucos se correlacionaram significativamente com os rendimentos das culturas.

Os rendimentos de grãos e de MS da cultura de aveia branca não se correlacionaram com nenhum dos atributos analisados, enquanto que os rendimentos de MS da ervilhaca e da soja foram os relacionados com mostraram maior número de atributos avaliados.

Tabela 44. Correlações (Pearson) entre rendimentos de grãos e de matéria seca de culturas com atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a três tipos de manejo e de rotações de culturas, após 22 anos sem calagem

| Variáveis correlacionadas | Correlação (r) | P (r = 0) | Camadas amostradas, cm |
|---------------------------------------|----------------|-----------|------------------------|
| Solução do solo | | | |
| MS soja e ativ. Al ³⁺ | -0,61 | 0,0008 | 0 a 6,7 |
| MS soja e ativ. AlOH ²⁺ | -0,63 | 0,0004 | 0 a 6,7 |
| MS soja e ativ. Al tóxico | -0,62 | 0,0006 | 0 a 6,7 |
| MS soja e ativ. Al DOM | 0,70 | <0,0001 | 0 a 6,7 |
| MS trigo e Al ³⁺ sol. solo | -0,61 | 0,0008 | 0 a 6,7 |
| RG sorgo e RP 0,5 kPa | -0,63 | 0,0049 | 0 a 6,7 |
| Física do solo | | | |
| RG sorgo e RP 0,5 kPa | -0,77 | 0,0002 | 6,8 a 20 |
| MS sorgo e RP 0,5 kPa | -0,61 | 0,0072 | 6,8 a 20 |
| MS ervilh. e RP 0,5 kPa | -0,66 | 0,0028 | 0 a 6,7 |
| Química do solo | | | |
| MS ervilhaca e P | 0,61 | 0,0068 | 0 a 6,7 |
| MS ervilhaca e MOP | 0,63 | 0,0052 | 0 a 6,7 |
| MS ervilhaca e Mn | 0,61 | 0,0071 | 6,8 a 20 |

RG = rendimento de grãos; MS = matéria seca; MOP = matéria orgânica particulada.

CONCLUSÕES

1. Os tipos de manejo de solo e as rotações de culturas testadas, e a interação entre estes não alteram a densidade do solo, os volumes de poros, a resistência à penetração do solo úmido, argila dispersa em água, condutividade hidráulica do solo saturado, alumínio, magnésio, saturação por bases e por alumínio, potássio, matéria orgânica, matéria orgânica particulada e matéria orgânica associada aos minerais, mas os valores destes atributos variam com a camada de solo. Em todos os tratamentos, foi observado uma camada superficial (0 a 6,7 cm) não compactada e outra sub-superficial (6,8 a 20 cm) compactada.
2. Os valores de resistência à penetração do solo seco, resistência à penetração do solo úmido são maiores e, os de condutividade hidráulica do solo saturado são menores na camada de 6,8 a 20 cm, restringindo mais o desenvolvimento das plantas nessa camada, em relação a camada de 0 a 6,7 cm. O teor da água disponível pelo intervalo hídrico ótimo é nulo na camada de 6,8 a 20 cm do PD.
3. Os manejos conservacionistas aumentam os valores de Ca, P, K, Zn, CTC do solo, e Ca, K, NH_4^+ , NO_3^- e carbono orgânico dissolvido na solução do solo enquanto o preparo convencional aumenta os valores de pH, índice SMP, percentual e atividade de alumínio na solução do solo e percentual e atividade do somatório das formas de alumínio tóxico na solução do solo, na camada de 0 a 6,7 cm e na média das rotação de culturas. Na solução do solo, o PD propicia maiores valores de carbono orgânico dissolvido e menor teor e atividade de Al,

amenizando a toxidez de Al, em relação aos demais tipos de manejo.

4. Na camada de 6,8 a 20 cm (compactada), as diferenças dos atributos físicos não são importantes, para fins agronômicos, entre os tratamentos; mas os valores dos atributos químicos são mais adequados para o desenvolvimento das culturas avaliadas nos manejos conservacionistas. Também nesta camada, em todos os tratamentos, os atributos de acidez do solo e da solução do solo são restritivos ao desenvolvimento de plantas.

5. Na safra avaliada, o rendimento de grãos não varia com o tipo de manejo de solo, exceto o da cultura do sorgo; nem com o tipo de rotação de culturas, exceto o da cultura de trigo. Os indicadores de produção das culturas de aveia branca e de ervilhaca não variam com os fatores estudados, nem com as interações entre os fatores. Os rendimentos anuais de palha das culturas são maiores nos manejos conservacionistas, enquanto que os das rotações são maiores naquelas com quatro ou mais espécies.

6. As rotações trigo e soja, ervilhaca e sorgo (R2) e trigo e soja, ervilhaca e sorgo, aveia branca e soja (R3) aumentam a produção de matéria seca da parte aérea.

7. As correlações entre os atributos físicos, os químicos e, entre atributos físicos e químicos são majoritariamente fracas. Correlações fortes são obtidas entre atributos dependentes pH e Al. Atributos importantes para avaliar a qualidade física do solo, contudo, mostram

correlação fraca ou muito fraca (densidade do solo e porosidade total, densidade e resistência do solo à penetração). Não se constata correlações fortes entre os rendimentos de culturas e atributos físicos e químicos de solos relevantes, em ambas as camadas, indicando que os atributos pouco influenciam nos rendimentos, mesmo havendo diferenças de níveis de restrição físicas e químicas das camadas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho indicam que, independente do tipo de manejo do solo e da rotação de cultura, o rendimento das culturas de grãos foi menor que as médias obtidas em experimentos, onde a calagem é efetuada regularmente, indicando que a qualidade física e química do solo está, em geral, inadequada.

Se por um lado, os atributos físicos do PD mostram índices, considerados pela literatura, como desfavoráveis às plantas, os teores de matéria orgânica e dos nutrientes essenciais, exceto de Ca e os valores dos atributos relacionados à acidez, foram favoráveis.

A análise da composição da solução solo indicou maiores níveis de COD no PD e que estes compostos complexaram e reduziram a atividade do Al. Os valores de COD da solução do solo do PD foram próximos aos da mata e indicam que a calagem pode ser utilizada em solos com PD, mais para suprir Ca e Mg, do que para neutralizar o Al em solução. Contudo, esta hipótese deve ser testada em futuros trabalhos.

Como não foi aplicado calcário, por duas décadas no solo do experimento, o valor do pH decresceu. No entanto, a acidificação do solo do experimento ainda não foi suficiente para atingir o valor do pH do solo com mata, porém, foi suficiente para comprometer a disponibilidade de nutrientes e o crescimento radicular das culturas, ao menos, nos últimos doze anos.

Pelos resultados observados, principalmente, os de rendimentos de grãos e da qualidade física do solo, o modelo de manejo de solo que foi conduzido, por décadas, sem um mínimo de mobilização do solo pode ser considerado inadequado. Por outro lado,

os resultados dos atributos físicos e da análise química da solução do solo indicam que não há razão de adotar o preparo com aração e gradagens na área do experimento. Assim, outros métodos de descompactação deverão ser desenvolvidos e adotados neste solo, quando cultivados com grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Plantas de cobertura de solo em sistemas agrícolas. In: ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; CAMARGO, F.A.O. *Manejo de sistemas agrícolas: impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa*. Porto Alegre: Gênese, 2006. cap.3, p.59-79.

ALMEIDA, J.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JR., W.A. Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.3, p.437-445, 2005.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.2, p.359-367, 2004.

AMARAL, F.C.S.; VETTORAZZO, S.C. *Especiação iônica da solução percolada de um solo tratado com lama de cal*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 21p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Solos, 70).

AMARAL, S.R.; LIRA, M.A.; TABOSA, J.N.; SANTOS, M.V.F.; MELLO, A.C.L.; SANTOS, V.F. Comportamento de linhagens de sorgo forrageiro submetidas a déficit hídrico sob condição controlada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.38, n.8, p.973-979, 2003.

AMBROSANO, E.J.; TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; QUAGGIO, J.A.; van RAIJ, B.; CANTARELLA, H. Leguminosas e

oleaginosas. In: van RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. *Recomendações de adubação e calagem par o Estado de São Paulo*. 2.ed. rev. atual. Campinas, Instituto Agrônômico / Fundação IAC, 1997. cap.19, p.187-205. (Boletim técnico, 100).

ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES, E.J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.40, n.8, p.797-802, 2005.

ANGHINONI, I.; SALET, R.L. Aluminum toxicity in no-tillage systems in southern Brazil. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., Montpellier. *Annals...* 1998. Montpellier, ISSS/AFES, 1998. CD-ROM.

ANGHINONI, I.; SALET, R.L. Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: KAMINSKI, J. (coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: SBCS-NRS, 2000, p.41-59. (SBCS – Núcleo Regional Sul. Boletim Técnico n, 4).

ARAÚJO FILHO, J.C. *Horizontes cimentados em Argissolos e Espodossolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja no Nordeste do Brasil*. São Paulo. USP. Instituto de Geociências. 223p. 2004 (Tese de Doutorado. Área de Geoquímica e Geotectônica).

ARAÚJO, A.R.; CARVALHO, J.L.N.; GUILHERME, L.R.G.; CURTI, N.; MARQUES, J.J. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.28, n.3, p.537-541, 2004.

AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.2, p.609-617, 2004.

AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de latossolo bruno pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, n.2, p. 191-198, 1996.

BARBOSA, J.F.; MATIELLO, R.R.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, J.M.S.; PEGORARO, D.G.; SCHNEIDER, F.; SORDI, M.H.B.; VACARO, E. Progresso genético no melhoramento da aveia-branca no Sul do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.8, p.1605-1612, 2000.

BARNI, N.A.; FREITAS, J.M.O.; ZANOTELLI, V.; SECHIN, J.; BUENO, A.C.; RIBEIRO, S.S.; MATZENAUER, R.; TOMAZZI, D.J.; ARGENTA, G.; TIMM, P.J.; DIDONÉ, I.A.; HILEBRAND, G. *Plantas recicladoras de nutrientes e de proteção do solo, para uso em sistemas equilibrados de produção agrícola*. Porto Alegre: FEPAGRO, 2003. 84p. (Boletim FEPAGRO, 12).

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.7, p.677-683, 2004.

BERGAMIN, M.; CANCIAN, M.A.E.; CASTRO, P.R.C. Ecofisiologia da soja. In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. (org.). *Ecofisiologia de cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca*. São Paulo: Nobel, 1999. p.73-90.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. El Niño: oscilação sul e a agricultura da região sul do Brasil. In: BERRI, G.J. *Efectos de El Niño sobre la variabilidad climática, agricultura y recursos hídricos en el Sudeste de Sudamérica*. Buenos Aires: Ministério de Cultura y Educación - Secretaría de Ciencia y Tecnología. p.27-30. 1997.

BERNARDI, A.C.C.; OLIVEIRA JR., J.P.; LEANDRO, W.M.; MESQUITA, T.G.S.; FREITAS, P.L.; CARVALHO, M.C.S. Doses e formas de aplicação da adubação potássica na rotação soja, milho e algodão em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.39, n.2, p.158-167, 2009.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JR., W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.1, p.155-163, 2004.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, 2001.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F.; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, n.1, p.91-95, 2000.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ANDRIOLI, I. Efeito da compactação do solo na estabilidade de agregados e no conteúdo gravimétrico de água. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.27, n.2, p.193-198, 2005.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. Resistência à penetração em Latossolos: limitante à produção de grãos de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., Goiânia, 2003. *Resumos expandidos*. Goiânia, CONBEA, 2003. CD-ROM.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. *Irriga*, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.3, p.639–645, 2006.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; PEREIRA Fº, I.A.; CRUZ, J.C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.1, p.129-136, 2001.

BEUTLER, J.F. *Parâmetros de solo e máquinas na semeadura direta de milho e soja em duas coberturas de solo sobre campo natural*. Tese (Doutorado) – PPGCS, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. 107f.

BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. Enxofre no solo. In: BORKERT, C.M.; LANTMANN, A. (org.). *Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira*. Londrina: EMBRAPA/IAPAR/SBCS, 1988, cap.1, p. 11-29.

BLANCANEUX, P.; FREITAS, P.L.; AMÁBILE, R.F. Sistematização e adaptação da metodologia para caracterização do perfil cultural. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE A METODOLOGIA DO PERFIL CULTURAL, 1991, Londrina. *Trabalhos apresentados...* Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1995. 28p.

BOHNEN, H. Acidez do solo: origem e correção. In: KAMINSKI, J. (coord.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*.

Pelotas: SBCS-NRS, 2000. p.9-19. (SBCS- Núcleo Regional Sul. Boletim Técnico, 4).

BOLLER, W.; GAMERO, C.A.; PEREIRA, J.O. Avaliação de diferentes sistemas de preparo e de condições de cobertura do solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.17, n.2, p.52-63, 1997.

BORKERT, C.M. Manganês. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. *Micronutrientes na agricultura*. Piracicaba: Potafós, 1991. p.173-188.

BRASIL. Ministério da Agricultura. DPP. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul*. Recife. 1973. 431 p. (Boletim técnico, 30).

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, Amsterdam, v.124, n.1, p.3-22, 2005.

CALEGARI, A.; HARGROVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S.; GUIMARÃES, M.F. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. *Agronomy Journal*, Madison, v.100, n.4, p.1.013-1.019, 2008.

CALVIÑO, P.A.; SADRAS, V.O. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.63, n.3, p.237-246, 1999.

CÂMARA, R.K. *Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja*. Dissertação (Mestrado). PPGAgro, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2004, 85p.

CÂMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *Revista Brasileira de*

Ciência do Solo, Viçosa, v.29, n.5, p.789-796, 2005a.

CÂMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.35, n.5, p.813-819, 2005b.

CAMARGO, A.O. Micronutrientes no solo. In: BORKERT, C.M.; LANTMANN, A. (org.). *Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira*. Londrina: EMBRAPA/IAPAR/SBCS, 1988, cap.5, p. 103-120.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas*. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.56, n.3, p.777-783, 1992.

CAMBRI, M.A. *Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto*. 2004. 83f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CANCÉS, B.; PONTHEIU, M.; CASTREC-ROUELLE, M.; AUBRY, E.; BENEDETTI, M. F. Metal ions speciation in a soil and its solution: experimental data and model results. *Geoderma*, Amsterdam, v.113, n.2, p.341-355, 2003.

CARDOZO, S.V.; PEREIRA, M.G.; RAVELLI, A.; LOSS, A. Caracterização de propriedades edáficas em áreas sob manejo orgânico e natural na região serrana do Estado do Rio de Janeiro. *Semina. Ciências Agrárias*, Londrina, v.29, n.3, p.517-530, 2008.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F.L. *Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação*. Santa Maria: UFSM /

Departamento de Engenharia Rural, 2005. 88p. (Caderno didático: n.4).

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.70, v.3, p.425-433, 1990.

CARVALHO, I.A.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média na região do Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.3, p.505-514, 1998.

CASSIOLATO, M.E.; MEDA, A.R., PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M.; OLIVEIRA, J.C. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v.43, n.5, p. 533-536, 2000.

CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M. Especificação química da solução do solo para interpretação da absorção de cálcio e alumínio por raízes de cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.26, n.3, p.447-453, 1991.

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, n.6, p.1.055-1.064, 2002.

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J.A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de latossolo bruno em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.2, p.317-326, 2004.

COELHO, M.R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de

perfis plúnticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru. I – Química. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.3, p.483-494, 2003.

COHORT SOFTWARES. *Free Trial Version of CoStat 6.4*. Disponível em www.cohort.com, Monterrey, CA, 2009. Acesso em: 02/04/2009.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. *Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. 2.ed. Passo Fundo: SBCS–NRS / EMBRAPA-CNPT, 1989. 128p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. *Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 3.ed. Passo Fundo: SBCS – NRS / EMBRAPA-CNPT, 1995. 224p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. *Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 10.ed. Passo Fundo: SBCS. CQFS, 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO T.J.C.; MIELNICZUK J.; SPAGNOLLO E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.5, p.777-788, 2005.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, n.3, p.527-535, 2003.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; FONTOURA,

S.M.V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, 2004.

CUNHA, G.R. *Meteorologia: fatos e mitos*. Embrapa Trigo: Passo Fundo, 1997. 294p.

CUNHA, G.R.; HAAS, J.C., DALMAGO, G.A.; PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.6, n.1, p.111-119, 1998.

CUNHA, G.R.; MALUF, J.R.T.; HAAS, J.C.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M. *Regionalização climática e suas implicações para o potencial de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 23 p. html (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 11). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_bp11.htm.

CUNHA, J.P.A.R.; CASCÃO, V.N.; REIS, E.F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v.31, n.3, p.371-376, 2009.

CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KAMPF, N.; MONIZ, A.C.; FONTES, L.E.F. Vocabulário de ciência do solo. Campinas: SBCS, 1993. 90p.

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*, Campinas, v.21, n.2, p.241-247, 1997.

DALMAGO, G.A.; CUNHA, G.R.; SANTI, A.; PIRES, J.L.F.; SCHWEIG, E. *Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola*.

Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 11 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 100). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do100.htm.

DE MARIA, I.C.; NNABUDE, P.C.; CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.51, n.1, p.71-79, 1999.

DEBIASI, H. *Recuperação física de um Argissolo compactado e suas implicações sobre o sistema solo-máquina-planta*. Tese (Doutorado) – PPGCS, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. 263f.

DECAGON DEVICES INCORPORATION. Washington. Disponível em: <http://www.decagon.com/manuals/WP4man21.pdf>. Acesso em: 10/10/2007.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M.S. (ed.). *Nutrição mineral de plantas*. SBRS: Viçosa, 2006, p.327-354.

DELLA FLORA, L.P.; ERNANI, P.R.; CASSOL, P.C. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um Cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31, n.6, p.1.591-1.598, 2007.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. *Estudo e desenvolvimento de sistemas de rotação de culturas incluindo espécies de cobertura verde e métodos de preparo do solo: relatório final do Projeto Contrôlo da Erosão no Paraná*. Londrina: IAPAR/GTZ, 1984. 106p.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil

- texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, Amsterdam, v.120, n.3, p.201-214, 2004.
- DIAZ-ZORITA, M.; GROVE, J.H.; PERFECT, E. Soil fragment size distribution and comparative effort effects on maize root seedling elongation in moist soil. *Crop Science*, Madison, v.45, n.4, p.1.047-1.057, 2005.
- DOURADO NETO, D.; JONG van LIER, Q.; BOTREL, T.A.; LIBARDI, P.L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. *Engenharia Rural*, Botucatu, v.1, n.1, p.92-102, 1990.
- ECHART, C.L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.31, n.3, p.531-541, 2001.
- EDMEADES, D.C.; WHEELER, D.M.; CLINTON, O.E. The chemical composition and ionic strength of soil solution from New Zealand topsoil. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v.23, n.1, p.151-165, 1985.
- EMBRAPA SOJA (Londrina, PR). *Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná 1999/2000*. Londrina, 1999. 236p. (Embrapa Soja. Documentos, 131).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2.ed. (trad. Maria Edna Tenório Nunes) Londrina: Ed. Planta, 2006. 401p.
- ERNANI, P.R. *Química do solo e disponibilidade de nutrientes*.

Lages: O Autor, 2008. 230p.

ERNANI, P.R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.4, p.939-946, 2001.

ESCOSTEGUY, P.A.V. *Exchangeable and formation constants of copper, zinc and cadmium with humic substances at indigenous concentrations*. PhD. Thesis in Soil Science. Madison: University of Wisconsin. 208p. 2001.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; KLEIN, V.A.; CERINI, J.B.; MACHADO, M.E. Toxidez de manganês em soja. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, v.95, n.5, p.28–37, 2006.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. San José de Costa Rica: IICA, 1994. 420 p. (IICA. Colección de Libros y Materiales Educativos, 81).

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. *Evolução do plantio direto*. Ponta Grossa, PR: Disponível em <http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html>. 2009. Acesso em: 10/01/2009.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, n.3, p.507-514, 1999.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.5, p.1316-1322, 2007.

FLOSS, E.L. *Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo do que está por trás do que se vê*. 3. ed. atual. e ampl. Passo Fundo: UPF Editora, 2006. 751p.

FLOSS, E.L.; PALHANO, A.L.; SOARES F^o, C.V.; PREMAZZI, L.M. Acúmulo e distribuição da matéria seca em aveia branca. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE AVEIA, 24. 2004. Pelotas, *Resultados experimentais*. Pelotas: UFPel, 2004. p.635-639.

FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; AMBROSI, I.; IGNACZAK, J.C.; REIS, E.M.; VOSS, M. *Sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, sob plantio direto*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 84p. (Embrapa Trigo. Circular Técnica, 6).

FONTES, M.P.F.; ALLEONI, L.R.F. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.63, n.6, p.589-608, 2006.

FRANCHINI, J.C.; BORKERT, C.M.; FERREIRA, M.M.; GAUDÊNCIO, G.A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, n.2, p.459-467, 2000.

FREITAS, J.G.; CANTARELLA, H.; CAMARGO, C.E.O.; FERREIRA F^o, A.W.P.; PETTINELLI JR., A.; RAMOS, V.J.; FELICIO, J.C. Resposta ao calcário e ao fósforo de genótipos de trigo com diferentes tolerâncias ao alumínio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília v.35, n.3, p. 557-566. 2000.

FREITAS, P.L. *Sistema plantio direto: conceitos, adoção e fatores limitantes*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 9p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico 31.).

GEBRIM, F.O.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; VERGÜTZ, L.; PROCÓPIO, L.C.; NUNES, T.N.; JESUS, G.L. Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camas de aviário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.32, nº especial, p.2.255-2.267, 2008.

GIACOMINI, S. J.; AITA C.; VENDRUSCOLO, E.R.O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R.S.; FRIES, M.R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura do solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 27, n.2, p.325-334, 2003.

GLOAGUEN, T.V.; PEREIRA, F.A.C.; GONÇALVES, R.A.B.; PAZ, V.S. Composição química da solução do solo nas diferentes classes de poros do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.33, n.5, p.1.105-1.113, 2009.

GODSEY, C.B.; PIERZYNSKI, G.M.; MENGEL, D.B.; LAMOND, R.E. Changes in soil pH, organic carbon, and extractable aluminum from crop rotation and tillage. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.71, n.5, p.1.038-1.044, 2007.

GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.2, p.223-227, 2002.

GRAPEGGIA JR., G.; AMADO, T.J.C.; SANTI, A.; PONTELLI, C.B. Acidificação do solo pelo uso prolongado de leguminosas como culturas de cobertura em sistemas de produção de milho. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, 2000,

- Pelotas. *Resumos Expandidos*. Pelotas: SBCS-NRS, 2000. p.252-258.
- GRIMM, D.M.; AZARRAGA, L.V.; CARRERA, L.A.; SUSETYO, W. Continuous multiligand distribution model used to predict the stability constant of copper (II) metal complexation with humic material from fluorescence quenching data. *Environmental Science and Technology*, Washington, v.25, n.9, p.1.427-1.431, 1991.
- GUSTAFSSON, J.P. *Visual MINTEQ A2 version 2,61*. Estocolmo: Department of Land and Water Resources Engineering. Disponível em: <http://www.lwr.kth.se/English/OurSoftware/vminteq/>. Acesso em: 22/01/2009.
- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage & Research*, Amsterdam, v.53, n.1, p.71-85, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (Brasília, DF). *SIDRA - Banco de dados agregados*. 2008. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em 30/12/2008.
- JANTÁLIA, C.P.; ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Mudanças no estoque de C do solo em áreas de produção de grãos: avaliação do impacto do manejo do solo. In: ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S., AITA, C.; BODDEY, R.M.; JANTÁLIA, C.P.; CAMARGO, F.A.O. (eds.). *Manejo de sistemas agrícolas. Impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa*. Porto Alegre: Genesis. p.35-57, cap.2, 2006.
- JIMENEZ, R.L.; GONÇALVES, W.G.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R.; SILVA, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,

Campina Grande, v.12, n.2, p.116–121, 2008.

JONG van LIER, Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.1, p.189-197, 2001.

JUCKSCH, I., COSTA, L.M., MOURA FILHO, W., RIBEIRO, A.C., SOPRANO, E. Efeito da calagem na dispersão de argila em latossolo vermelho-escuro. *Revista Ceres*, Viçosa, n.33, n.6, p.456-460, 1986.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Mineral surfaces and soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.54, n.2, p.219–236, 2003.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. A acidez do solo e a nutrição mineral de plantas. In: KAMINSKI, J. (ed.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas: SBSC/NRS, 2000. cap.2, p.21-39.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. *Tópicos Especiais em Ciência do Solo*, Viçosa, v.3, p.1-54, 2003.

KERTZMANN, F.F. *Modificações na estrutura e no comportamento de um latossolo roxo provocadas pela compactação*. São Paulo, 1996. 153p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

KINRAIDE, T.B. Identify of the rhizotoxic aluminium species. In: *WRIGHT, R.S.; BALIGAR, V.C.; MURRMANN, R.P. (Ed.). Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer: Dordrecht, 1991. p.717-728.

KLEIN, V.A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v.5, n.1, p.26-32, 2006.

KLEIN, V.A. *Física do solo*. Passo Fundo: UPF Editora. 2008, 212p.

KLEIN, V.A. *Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira*. Passo Fundo: Ed. UPF, 2005. 61p.

KLEIN, V.A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. Piracicaba: ESALQ-USP. 1998. 150p. (Tese. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

KLEIN, V.A.; CÂMARA, R.K. Rendimento de soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31, n.2, p.221-227, 2007.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um latossolo roxo não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.32, n.6, p.945-953, 2002.

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

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D.; RIBEIRO, C.M.; FERRARO, L.A. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.57, n.1, p.97-104, 2000.

KOAKOSKI, A.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L.; SOUZA, L.C.F.; REIS, E.F. Desempenho de semeadora-adubadora utilizando-se dois mecanismos rompedores e três pressões da roda compactadora. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.42, n.5, p.725-731, 2007.

KOCHHANN, R.A. Conservation tillage in southern Brazil. In:

INTERNATIONAL WORKSHOP ON CONSERVATION TILLAGE SYSTEMS, 1. 1990, Passo Fundo. *Anais...* Passo Fundo, CNPT-EMBRAPA, 1990. 24p.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; FLORES, C.A.; FERREIRA, T.N.; CASSOL, E.A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R.A. Enxurrada em sistema plantio direto. In: DENARDIN, J.E. KOCHHANN, R.A.; FLORES, C.A.; FERREIRA, T.N.; CASSOL, E.A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R.A. *Manejo de enxurrada em sistema plantio direto*. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2005. p.47-54.

KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.A.; PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Palo Alto, v.55, p.459-493. 2004.

KRAUSKOPF, K.B. Geochemistry of micronutrients. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. *Micronutrients in agriculture*. SSSA, Madison, p.7-40. 1973.

KRAVCHENKO, A.N.; BULLOCK, D.G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, Madison, v.92, n.1, p.75-83, 2000.

LANGE, A.; CARVALHO, J.L.N.; DAMIN, V.; CRUZ, J.C.; MARQUES, J.J. Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema semeadura direta na cultura do milho. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.2, p.460-467, 2006.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531p.

- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, New York, v.1, n.1, p.277-294, 1985.
- LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.
- LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, L.F.C. Intervalo hídrico ótimo e porosidade de solos cultivados em área de proteção ambiental do sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.33, n.5, p.1.087-1.095, 2009.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, Amsterdam, v. 116, p. 107-136, 2003.
- LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, E.M.R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica *Ciência Rural*, Santa Maria, v.39, n.4, p.1.077-1.082, 2009.
- MALAVOLTA, E. *Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos*. São Paulo: ProduQuímica, 1994. 153p.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MARCOLIN, C.D. *Propriedades físicas de um nitossolo e latossolos argilosos sob plantio direto*. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2006. 98p. (Dissertação. Mestrado em Agronomia).
- MARTINAZZO, R. *Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado*. Santa Maria: UFSM-CCR-PPGCS, 2006. 82f. (Dissertação. Mestrado em Ciência do Solo).

MASCARENHAS, H.A.A. Alumínio e manganês no cultivo da soja em São Paulo. *O Agrônomo*, Campinas, 56, n.1, p.16-19. 2004.

MATZENAUER, R.; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.33, n.6, p.1.013-1.019, 2003.

MATZENAUER, R.; VIANA, D.R.; BUENO, A.C.; MALUF, J.R.T.; CARPENEDO, C.B. Regime anual e estacional de chuvas no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracajú. *Anais...* Aracajú: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. 1 CD-ROM. 5p.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.R.; FERREIRA, D.F.; LIMA, J.M.; LOPES, D. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.9, n.1, p.23-29, 2005.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.R.; RESCK, D.V.S.; LIMA, J.M.; DIAS JR., M.S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência & Agrotecnologia*, Lavras, v.26, n.4, p.836-841, 2002.

MELLO, R.; NÖRNBERG, J.L.; ROCHA, M.G. Potencial produtivo e qualitativo de híbridos de milho, sorgo e girassol para ensilagem. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v.10, n. 1, p. 87-95, 2004.

MENDONÇA, R.J.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, M.A.; OLIVEIRA, J.A. Capacidade de cultivares de arroz de modificar o pH de soluções nutritivas na presença de alumínio *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.40, n.5, p.447-452, 2005.

MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E.J. (Ed.). *Fundamentos de química do solo*. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p.91-115.

MEURER, E.J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos, In: MEURER, E.J. *Fundamentos de química do solo*. 3ª ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p.171-162.

MINETTO, T. *Custo de produção da lavoura de soja no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: EMATER/RS. Disponível em: http://www.emater.tche.br/custo_de_producao.htm. Acesso em 25/03/2009.

MIRANDA, J.; COSTA, L.M.; RUIZ, H.A.; EINLOFT, R. Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.30, n.4, p.633-647, 2006.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CHIERICE, G.O. Determinação de alumínio em soluções puras contendo ácidos orgânicos e em solo com eletrodo seletivo de fluoretos. *Química Nova*, São Paulo, v.15, n.4, p.286-290, 1992.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Resíduos vegetais: influência na química de solos ácidos. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1. Ponta Grossa, 2000. *Anais...* Ponta Grossa, IAPAR - AEA dos Campos Gerais, 2000. p.82-94.

MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e*

Ambiental, Campina Grande, v.10, n.1, p.30–37, 2006.

MOREIRA, S.G.; KIEHL, J.C.; PROCHNOW, L.I.; PAULETTI, V. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.1, p.71-81, 2001.

MOREIRA, S.G.; PROCHNOW, L.I.; KIEHL, J.C.; MARTIN NETO, L.; PAULETTI, V. Formas químicas, disponibilidade de manganês e produtividade de soja em solos sob semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.30, n.1, p.121-136, 2006.

MOTA, F.S. Influência do clima sobre o rendimento do trigo no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.6, n.1, p.121-124, 1998.

MÜLLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.3, p.531-538, 2001.

MUZILLI, O. Plano integrado para o manejo e conservação do solo em microbacias hidrográficas piloto: a experiência do Paraná na região do arenito Caiuá. In: *Manejo integrado de solos em microbacias hidrográficas*. Londrina: IAPAR/SBCS, 1996. p.97-119.

NEVES, C. S. V.J.; FELLER, C.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; TAVARES FILHO, J.; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by the cropping profile method in clayey Oxisols in Brazil. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.71, n.2, p.109-119, 2003.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo

do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.5, p.1.410-1.415, 2006.

NICOLOSO, R.S. *Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema de plantio direto*. 2005. 150f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E., GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.32, n. 6, p:1.723-1.734, 2008.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.30, n.4, p.955-963, 2006.

NOLLA, A.; SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Crescimento, morfologia radicular e liberação de compostos orgânicos por plântulas de soja em função da atividade de alumínio na solução do solo de campo natural. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.1, p.97-101, 2007.

NOVAIS, R.F.; MELLO, J.W.V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R.F.; ALVÁREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap.4. p.133-204.

OLIVEIRA, F.A.; CAMPOS, T.G.S.; OLIVEIRA, B.C. Efeito de

tensões de água no solo sobre o rendimento do algodoeiro herbáceo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.10, p.1.905-1.911, 1999.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ-VENEGAS, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (eds.). *Tópicos de ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.393-486, 2002.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.2, p.327-336, 2004.

OLIVEIRA, J.B. *Pedologia aplicada*. 3.ed. Piracicaba: FEALQ, 2008. 592p.

PASSIOURA, J.B. Soils conditions and plant growth. *Plant, Cell, and Environment*. Oxford, v.25, N.2, p.311-318, 2002.

PAULETTI, V.; LIMA, M.R.; BARCIK, C.; BITTENCOURT, A. Rendimento de grãos de milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.33, n.3, p.491-495, 2003.

PAVAN, M.A.; TAKACHI, C.Y.; MIYAZAWA, M. Estimativa da força iônica corrigida para pares de íons através da condutividade elétrica da solução do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.19, n.3, p.345-348, 1995.

PEDERSEN, P.; LAUER, J.G. Corn and soybean response to rotation sequence, row spacing, and tillage system. *Agronomy Journal*,

Madison, v.95, n.1, p.965-971, 2003.

PEREIRA NETO, O.C.; GUIMARÃES, M.F.; RALISCH, R.; FONSECA, I.C.B. Análise do tempo de consolidação do sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.11, n.5, p.489–496, 2007.

PÉREZ, D.V.; CAMPOS, R.C. *Especiação em solos: aspectos gerais*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 33p. (Embrapa Solos. Documentos; n. 47).

PÉREZ, D.V.; SALDANHA, M.F.C.; MENEGUELLI, N.A.; MOREIRA, J.C.; VAITSMAN, D.S. *Geoquímica de alguns solos brasileiros*. Rio de Janeiro: EMBRAPA–CNPS. 1997. 14p. (EMBRAPA CNPS. Pesquisa em andamento, 4).

PERNES-DEBUYSER, A.; TESSIER, D. Soil physical properties affected by long-term fertilization. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.55, n.3, p.505-512, 2004.

PICCININ, J.L. *Modificações no perfil de solo sob plantio direto contínuo e com intervenção mecânica sob sucessão e rotação de culturas*. Tese (Doutorado). Campinas, Universidade Estadual de Campinas: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. 121p. 2005.

PIRES, J.L.F.; LIMA, M.I.P.M. VOSS, M.; SCHEEREN, P.L.; WIETHÖLTER, S.; CUNHA, G.R.; IGNACZAK, J.C.; CAIERÃO, E. *Avaliação de cultivares de trigo em sistema de manejo tradicional e otimizado*, Passo Fundo, 2004. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2005. 19p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 54). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do54.htm.

PLATAFORMA PLANTIO DIRETO. *Plantio direto: problemas e*

soluções. Disponível em: [http://www22.sede.embrapa.br/plantiodireto/ ProblemaSolucao/index.htm](http://www22.sede.embrapa.br/plantiodireto/ProblemaSolucao/index.htm). Acesso em 19/02/2005.

PÖTTKER, D. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do planalto médio gaúcho. In: SÁ, J.C.M. (coord.). *Curso sobre manejo do solo no sistema plantio direto*. Castro, PR: Fundação ABC, 1995b. cap.5, p.202-243.

PÖTTKER, D. Correção da acidez de solo no sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1, 1995, Passo Fundo, RS. *Resumos...* Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995a. p.15-19.

PÖTTKER, D.; BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.3, p.675-684, 1998.

PRESTES, A.M.; SANTOS, H.P.; REIS, E.M. Práticas culturais e incidência de manchas foliares em trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.6, p.791-797, 2002.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole. 2000. 478p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade agrícolas. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, v.27, n.2, p.29-48, 2003.

REIS, E.F.; FERNANDES, H.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; ARAÚJO, E.F. Avaliação de mecanismos rompedores e compactadores em semeadura direta. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.12, n.2, p.212-221, 2004.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, S.A. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 4.ed. Viçosa, MG, NEPUT, 2002. 338p.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.1, p.151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, n.2, p.345-354, 2000b.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F.M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, n.2, p.263-268, 2000a.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência & Agrotecnologia*, Lavras, v.31, n.4, p.1.167-1.175, 2007.

RICHTER, I.U.; RICHTER, R.L. Análise histórica da precipitação pluvial para a cultura da soja. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, v.19, n.111, p.6-9, 2009.

RODRIGUES, J.A.S.; SANTOS, F.G. (eds.). *Cultivo do sorgo*. 3.ed. Embrapa Milho e Sorgo: Sete Lagoas, 2007 (Sistemas de Produção, 2. Versão Eletrônica. 2007).

RODRIGUES, O.; LHAMBY, J.C.B.; DIDONET, A.D.; MARCHESE, J.A.; SCIPIONI, C. Efeito da deficiência hídrica na

produção de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.6, p.839-846, 1998.

ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.A. *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.

ROSSIELO, R.O.P.; JACOB NETTO, J. Toxidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M.S. (ed.). *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa: SBCS, 2006. p.375-418.

RUEDELL, J. *Plantio direto na região de Cruz Alta*. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 1995.134p.

SÁ, J.M.C. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. *Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. SBCS/UFLA-DCS, Lavras, p.267-319. 1999.

SÁ, S.S. *Caracterização geoquímica das precipitações atmosféricas do município de Rio Grande, RS*. Rio Grande, 2005. 79p. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande, 2005.

SACRAMENTO, L.V.S.; ROSOLEM, C.A. Eficiência de absorção e utilização de potássio por plantas de soja em solução nutritiva *Bragantia*, Campinas, v 57, n.2, p 355 365, 1998.

SALET, R.L. *Toxidez de alumínio no sistema plantio direto*. Porto Alegre: UFRGS/PPGA, 1998, 109f. (Tese. Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo).

SALET, R.L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R.A. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. *Revista*

Científica Unicruz, Cruz Alta, v.1, n. 1, p. 9-13, 1999.

SALKIND, N.J. *Statistics for people who (think they) hate statistics*. 2.ed. Sage Publicaions: Thousand Oaks, 2005. 424p.

SANTOS, H.P.; FANCELLI, A.L.; ANDIA, L.H. Análise econômica de sistemas de rotação de culturas para trigo, num período de dois anos, sob sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.32, n.11, p.1.111-1.117, 1997.

SANTOS, H.P.; FANCELLI, A.L.; REIS, E.M.; LHAMBY, J.C.B. Efeito da rotação de culturas no rendimento de grãos e na severidade de doenças do sistema radicular de trigo em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.30, n.7, p.923-929, 1995.

SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; SPERA, S.T.; TOMM, G.O. Efeito de pastagens de inverno e de verão na disponibilidade de nutrientes e no nível de matéria orgânica do solo, sob plantio direto. In: EMBRAPA TRIGO. *Soja: resultados de pesquisa 2003-2004*. Passo Fundo, 2004. p.126-149.

SANTOS, H.P.; LHAMBY, J.C.B.; PRESTES, A.M.; LIMA, M.R. Efeito de sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas de inverno no rendimento e doenças de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.12, p.2.355-2.361, 2000.

SANTOS, H.P.; LHAMBY, J.C.B.; PRESTES, A.M.; REIS, E.M. Características agronômicas e controle de doenças radiculares de trigo, em rotação com outras culturas de inverno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.3, p.277-288, 1998.

SANTOS, H.P.; LHAMBY, J.C.B.; SPERA, S.T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de

rotação de culturas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 6, n.1, p.21-29, 2006a.

SANTOS, H.P.; LHAMBY, J.C.B.; SPERA, S.T.; ÁVILA, A. Efeito de práticas culturais sobre o rendimento e outras características agronômicas de trigo. *Bragantia*, Campinas, v.65, n.4, p.669-677, 2006b.

SANTOS, H.P.; REIS, E.M. Rotação de culturas. In: SANTOS, H.P.; REIS, E.M. *Rotação de culturas em plantio direto*. 2.ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2003. cap.1, p.11-132.

SANTOS, H.P.; REIS, E.M.; LHAMBY, J.C.B.; WOBETO, C. Efeito da rotação de culturas sobre o trigo, em sistema plantio direto, em Guarapuava, PR. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.31, n.4, p.259-267, 1996.

SANTOS, H.P.; ROMAN, E.S. Efeitos de culturas de inverno e rotações sobre a soja cultivada em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v.7, n.1, p.59-68, 2001.

SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.33, n.3, p.477-486, 2003.

SANTOS, M.N. *Influência de diferentes sistemas de manejo nos teores de carbono orgânico e nutrientes e no tamanho e distribuição de poros em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso na Região dos Cerrados*. Universidade de Brasília, 1997, 133p. (Dissertação de Mestrado em Ecologia).

SARAIVA, O.F.; TORRES, E. *Estimação da cobertura do solo por resíduos culturais*. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Soja: Londrina, 1993. 4p. (CNPSo. Pesquisa em andamento, 14).

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. *Agronomy Journal*, Madison, v.88, n.5, p.844-851, 1996.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, C.M.; MERNES, F.J.V.; VIANA, J.H.M.; GALVÃO, J.; RIBEIRO, L.M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.3, p.765-769, 2001.

SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, n.3, p.611-617, 2000.

SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.32, n.5, p.2.037-2.049, 2008.

SCHULZE, D.G.; STOTT, D.E. Soil structure alterations: the role of soil mineralogy, chemistry, and microbiology. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Viçosa: SBCS, 1997. 19p. (CD-ROM).

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

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; LIMA, J.F.W.F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*,

Viçosa, v.29, n.4, p.833-842, 2005.

SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.61, n.4, p.451-456, 2004a.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.184, n.2, p.323-329, 1996.

SILVA, E.P., CUNHA, G.R.; PIRES, J.L.F.; DALMAGO, G.A.; PASINATO, A. Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo à geada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.43, n.10, p.1.257-1.265, 2008.

SILVA, L.A.; MARTINS, C.R.; ANDRADE, J.B. Por que todos os nitratos são solúveis? *Química Nova*, São Paulo, v.27, n.6, p.1.016-1.020, 2004b.

SILVA, L.S. *Dinâmica da matéria orgânica e a interação com componentes inorgânicos na planta e no solo*. Porto Alegre, 2001. 167p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2001.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.10, p.1269-1275, 2001.

SIQUEIRA, O.J.F.; SCHERER, E.E.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, J.F.; TEDESCO, M.J.; MILAN, P. A.; ERNANI, P.R. *Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT,

1987. 100 p.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOCHHANN, R.A.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.76, n.1, p.39-58, 2004.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M; MORAES-SÁ, J.C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. *Agronomie*, Paris, v.22, n.6, p.755–775, 2002.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 7.ed. Ames: Iowa State University Press. 507p. 1982.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. *Glossary of soil science terms 2008*. SSSA: Madison, 2008. 88p. (versão eletrônica).

SORATTO, R.P.; SILVA, T.R.B.; BORGHI, E.; SILVA, L.M.; ROSOLEM, C.A. Resposta de quatro cultivares de feijão ao manganês em solução nutritiva *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v.11, n. 2, p. 235-240, 2005.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVÁREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap.5. p.205-274.

SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E.J. (Ed.). *Fundamentos de química do solo*. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p.185-209.

SOUZA, L.A.C. Reação de genótipos de soja ao alumínio em

hidroponia e no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.10, p.1255-1260, 2001.

SPARKS, D.L. *Environmental soil chemistry*. San Diego: Academic Press, 1995. 267p.

SPERA, S.T., DENARDIN, J.E., ESCOSTEGUY, P.A.V., SANTOS, H.P., FIGUEROA, E.A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.32, n. especial, p.2.613–2.620, 2008.

SPERA, S.T., SANTOS, H.P., FONTANELI, R.S., TOMM, G.O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. *Ciência Rural*. Santa Maria, v.36, n.4, p.1.193–1.200, 2006.

SPERA, S.T., SANTOS, H.P., FONTANELI, R.S., TOMM, G.O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.33, n.1, p.129-136, 2009.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n. 3, p.533-542, 2004.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O.; SPERA, M.R.N. Alterações na estrutura do solo causadas pela compactação, em sistemas de integração lavoura/pecuária sob plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE: SEQUESTRO DE CARBONO E QUALIDADE DA ÁGUA, 2005, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: FBPDP; Itaipú Binacional, 2005, p. 238-240.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; TOMM, G.O.; KOCHHANN, R.A. Efeito de sistemas de manejo em atributos físicos do solo. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v.13, n.1-2, p.61-68, 2007.

SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.

SPOSITO, G. *The environmental chemistry of aluminum*. 2.ed. Boca Raton: CRC Press Inc., 1996. 464p.

STAATS, K.E. *Phosphorus in alum amended poultry litter systems: distribution, speciation, and interactions with aluminum oxides*. University of Delaware: Newark, 120p. 2005. (Thesis of Master of Science in Plant and Soil Science).

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeito do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.2, p.395-401, 2001.

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

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. *Solos do Rio Grande do Sul*. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.

SUZUKI, L.E.A.S.; ALVES, M.C. Produtividade do milho (*Zea mays* L.) influenciada pelo preparo do solo e por plantas de cobertura em um Latossolo Vermelho. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v.26, n.1, p.61-65, 2004.

SZÚCS, P.; VEISZ, O.; BEDŐ, Z. Frost tolerance of *Triticum durum*

(Desf.) genotypes in soils with various moisture contents. *Cereal Research Communications*, Budapeste, v.31, n.1, p.153-160, 2003.

TAIZ, L., ZEIGER, E.; Tradução SANTARÉM, E.R. *Fisiologia vegetal*. 3.ed., 1.reimpr. Porto Alegre: Artmed, 2006, 719p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. rev. ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS. 1995. 174p. (Boletim Técnico/ UFRGS. Departamento de Solos; n.5).

TOMM, G.O.; SANTOS, H.P.; SPERA, S.T.; KOCHHANN, R.A. Efeitos de sistemas de manejo em atributos químicos do solo. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v.13, n.1-2, p.47-59, 2007.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo em latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.3, p.573-581, 1998.

TORRES, E.; ALMEIDA, A.M.R.; SARAIVA, O.F.; HENNING, A.A.; FRANCHINI, J.C.; GALERANI, P.R.; FERREIRA, L.P. *Morte de plântulas de soja provocada pelo excesso de umidade e falta de aeração do solo*. Londrina, Embrapa Soja, 2004. 31p. (Documentos, 239).

van GENUCHTEN, M.T. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. Madison, v.44, n.5, p.892-897, 1980.

van RAIJ, B. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Ed. Agronômica Ceres, POTAFÓS. 1991. 343p.

VENTIMIGLIA, L.A.; COSTA, J.A.; THOMAS, A.L.; PIRES, J.L.F. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de

fósforo no solo e dos espaçamentos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.2, p.195-199, 1999.

VIANA, J.H.M.; FERNANDES Fº, E.I.; SCHAEFER, C.E.G.R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.1, p.11-19, 2004.

VIEIRA, F.C.B.; BAYER, C.; ZANATTA, J.; ERNANI, P.R. Organic matter kept Al toxicity in a subtropical no-tillage soil under long-term (21-year) legume-based crop systems and N fertilization. *Australian Journal of Soil Research*, Victoria, v.47, n.7, p.707-714, 2009.

VITTI, G.C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M.S. (ed.). *Nutrição mineral de plantas*. SBCS: Viçosa, 2006, p.299-325.

WOLT, J.D. *Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 345p.

YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. *Potássio na agricultura brasileira*. 5.ed. Piracicaba: Ed. POTAFÓS. 2005. 841p.

YUSUF, R.I.; SIEMENS, J.C.; BULLOCK, D.G. Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. *Agronomy Journal*, Madison, v.91, n.6, p. 928-933, 1999.

ZAMBROSI, F.C.B. *Calagem e gessagem na especiação iônica de um Latossolo sob sistema de plantio direto*. Piracicaba, 2004. 111p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz / USP, 2004.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Liming and ionic speciation of an oxisol under no-till system. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.65, n.2, p.190-203, 2008.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F.; CAIRES, E.F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.1, p.110-117, 2007.

ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; DIEKOW, J.; MILENICZUK, J. Adição de resíduo e estoque de carbono em camadas superficiais e subsuperficiais num Argissolo sob sistemas de preparo e de culturas. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE: SEQÜESTRO DE CARBONO E QUALIDADE DA ÁGUA, 1. 2005, Foz do Iguaçu. *Anais...*, 2005. v.1. p.200-202.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, Sydney, v.38, n.5, p.947-958, 2000.

APÊNDICES

Apêndice A. Valores de probabilidade de erro (p) dos atributos físicos do solo, em duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores

| Variável | Camada | Manejo | Rotação | M x R |
|-----------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Ds | 0-6,7 cm | 0,9124^{ns} | 0,8398^{ns} | 0,1914^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,5421 ^{ns} | 0,2838 ^{ns} | 0,3709 ^{ns} |
| PT | 0-6,7 cm | 0,8697^{ns} | 0,7113^{ns} | 0,2402^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,4779 ^{ns} | 0,3495 ^{ns} | 0,4484 ^{ns} |
| Macrop | 0-6,7 cm | 0,7945^{ns} | 0,8395^{ns} | 0,2169^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,8399 ^{ns} | 0,2120 ^{ns} | 0,3890 ^{ns} |
| Microp | 0-6,7 cm | 0,2198^{ns} | 0,7475^{ns} | 0,7868^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,8809 ^{ns} | 0,6987 ^{ns} | 0,8978 ^{ns} |
| Criptop | 0-6,7 cm | 0,1490^{ns} | 0,9469^{ns} | 0,4381^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,3959 ^{ns} | 0,8790 ^{ns} | 0,4209 ^{ns} |
| DR | 0-6,7 cm | 0,0312* | 0,8449^{ns} | 0,1856^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,2199 ^{ns} | 0,1000 ^{ns} | 0,0116* |
| RP 10 kPa | 0-6,7 cm | 0,5210^{ns} | 0,4088^{ns} | 0,5195^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,3074 ^{ns} | 0,5418 ^{ns} | 0,4438 ^{ns} |
| RP 300 kPa | 0-6,7 cm | 0,4858^{ns} | 0,3309^{ns} | 0,4403^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,0126* | 0,0671 ^{ns} | 0,0505 ^{ns} |
| RP 500 kPa | 0-6,7 cm | 0,0119* | 0,8643^{ns} | 0,0732^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,0407* | 0,5084 ^{ns} | 0,0915 ^{ns} |
| ADA | 0-6,7 cm | 0,1460^{ns} | 0,7575^{ns} | 0,2976^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,0772 ^{ns} | 0,0901 ^{ns} | 0,0911 ^{ns} |
| CHSS | 0-6,7 cm | 0,4221^{ns} | 0,3015^{ns} | 0,4236^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,2893 ^{ns} | 0,9893 ^{ns} | 0,4635 ^{ns} |
| Fe_o | 0-6,7 cm | 0,0745^{ns} | 0,2912^{ns} | 0,4053^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,0316* | 0,0255* | 0,0378* |
| Al_o | 0-6,7 cm | 0,9896^{ns} | 0,5697^{ns} | 0,4909^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,6500 ^{ns} | 0,5885 ^{ns} | 0,2988 ^{ns} |

M x R = interação entre os fatores tipos de manejo de solo e rotações de culturas. Ds = densidade do solo; PT = porosidade total; Macrop = macroporosidade; Microp = microporosidade; Criptop = criptoporosidade; DR = densidade relativa; RP = resistência do solo à penetração nas tensões 10, 300 e 500 kPa; ADA = argila dispersa em água; CHSS = condutividade hidráulica do solo saturado; Fe_o e Al_o = respectivamente ferro e alumínio extraídos pelo oxalato de amônio.

Apêndice B. Valores de probabilidade de erro (p) dos atributos químicos do solo, em duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores

| Variável | Camada | Manejo | Rotação | M x R |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| pH água | 0-6,7 cm | 0,1909^{ns} | 0,3550^{ns} | 0,8025^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0038** | 0,7589 ^{ns} | 0,8062 ^{ns} |
| Índ. SMP | 0-6,7 cm | 0,0519^{ns} | 0,2485^{ns} | 0,5692^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0333* | 0,3341 ^{ns} | 0,8826 ^{ns} |
| Al | 0-6,7 cm | 0,9813^{ns} | 0,1948^{ns} | 0,4693^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0582 ^{ns} | 0,3468 ^{ns} | 0,8561 ^{ns} |
| Ca | 0-6,7 cm | 0,0434* | 0,1456^{ns} | 0,3139^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,1637 ^{ns} | 0,0646 ^{ns} | 0,3599 ^{ns} |
| Mg | 0-6,7 cm | 0,0542^{ns} | 0,5901^{ns} | 0,9970^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,1636 ^{ns} | 0,6997 ^{ns} | 0,6435 ^{ns} |
| Rel. Ca:Mg | 0-6,7 cm | 0,5541^{ns} | 0,0801^{ns} | 0,8097^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,2716 ^{ns} | 0,0400* | 0,0252* |
| CTC | 0-6,7 cm | 0,0017** | 0,0198* | 0,0871^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0001*** | 0,3516 ^{ns} | 0,8224 ^{ns} |
| Sat Bases (V) | 0-6,7 cm | 0,9701^{ns} | 0,5488^{ns} | 0,4143^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,2680 ^{ns} | 0,2560 ^{ns} | 0,8104 ^{ns} |
| Sat Al (m) | 0-6,7 cm | 0,7595^{ns} | 0,3030^{ns} | 0,6145^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,1765 ^{ns} | 0,2924 ^{ns} | 0,7403 ^{ns} |
| P | 0-6,7 cm | 0,0055** | 0,8377^{ns} | 0,7861^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0314* | 0,6594 ^{ns} | 0,8354 ^{ns} |
| K | 0-6,7 cm | 0,3366^{ns} | 0,2300^{ns} | 0,3307^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0726 ^{ns} | 0,5930 ^{ns} | 0,2297 ^{ns} |
| Rel. Ca+Mg:K | 0-6,7 cm | 0,0603^{ns} | 0,9698^{ns} | 0,0306* |
| | 6,8-20 cm | 0,2476 ^{ns} | 0,4041 ^{ns} | 0,0099** |
| MOS (anál. rotina) | 0-6,7 cm | 0,2131^{ns} | 0,1979^{ns} | 0,8739^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0733 ^{ns} | 0,2916 ^{ns} | 0,4082 ^{ns} |
| Mn | 0-6,7 cm | 0,0181* | 0,0131* | 0,7273^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0189* | 0,1278 ^{ns} | 0,8732 ^{ns} |
| S | 0-6,7 cm | 0,1374^{ns} | 0,0386* | 0,5365^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,2617 ^{ns} | 0,0134* | 0,6923 ^{ns} |
| B | 0-6,7 cm | 0,2484^{ns} | 0,0002*** | 0,2439^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,3934 ^{ns} | 0,0000*** | 0,0989 ^{ns} |
| Zn | 0-6,7 cm | 0,0422* | 0,1593^{ns} | 0,5381^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0013** | 0,0233* | 0,3004 ^{ns} |

M x R = interação entre os fatores tipos de manejo de solo e rotações de culturas. Índ. SMP = índice do SMP; Rel. Ca:Mg = relação entre Ca e Mg; Sat Bases = saturação por bases; Sat Al = saturação por alumínio; Rel. Ca+Mg:K = relação entre a soma de Ca e Mg e o K; MOS = matéria orgânica do solo.

Apêndice C. Valores de cátions, ânions e outros atributos (mmol L^{-1}) determinados na solução de solo, de um LVd, em função dos tipos de manejos, após 22 sem calagem

| Tipo de manejo | Camada cm | CE mS cm^{-1} | pH _{gáua} 1:1 | Cations | | | | | | |
|----------------|--------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------|--|
| | | | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ | Al ³⁺ | |
| PD | 0-6,7 | 1,557 | 5,14 | 2,61 | 2,76 | 2,17 | 2,43 | 0,87 | 0,06 | |
| | 6,8-20 | 0,564 | 5,18 | 1,00 | 0,72 | 1,18 | 1,42 | 0,46 | 0,11 | |
| PC | 0-6,7 | 0,697 | 5,12 | 1,19 | 0,87 | 1,04 | 1,11 | 0,20 | 0,19 | |
| | 6,8-20 | 0,600 | 5,06 | 1,35 | 0,90 | 0,62 | 0,76 | 0,20 | 0,16 | |
| PM | 0-6,7 | 0,929 | 5,13 | 1,58 | 1,41 | 1,38 | 1,52 | 0,49 | 0,12 | |
| | 6,8-20 | 0,526 | 5,02 | 1,21 | 0,74 | 0,91 | 1,03 | 0,41 | 0,19 | |
| Mata | 0-6,7 | 0,629 | 4,97 | 2,00 | 2,99 | 0,32 | 0,48 | 1,20 | 0,29 | |
| | 6,8-20 | 0,406 | 4,79 | 1,01 | 1,62 | 0,15 | 0,26 | 0,46 | 0,32 | |

| Anions e C.O.D. | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|----------|------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|
| Tipo de manejo | Camada cm | Eh mV | COD | PO ₄ ³⁻ | NO ₃ ⁻ | NO ₂ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | F ⁻ |
| | | | | | | | | | |
| PD | 0-6,7 | 366 | 4,50 | 0,015 | 6,35 | 0,03 | 0,14 | 0,16 | 0,03 |
| | 6,8-20 | 365 | 2,89 | 0,013 | 3,78 | 0,02 | 0,12 | 0,13 | 0,01 |
| PC | 0-6,7 | 430 | 1,36 | 0,013 | 4,39 | 0,02 | 0,05 | 0,23 | 0 |
| | 6,8-20 | 428 | 1,49 | 0,012 | 4,19 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,01 |
| PM | 0-6,7 | 425 | 2,30 | 0,012 | 4,88 | 0,03 | 0,08 | 0,13 | 0,01 |
| | 6,8-20 | 275 | 2,89 | 0,013 | 4,17 | 0,02 | 0,07 | 0,28 | 0,01 |
| Mata | 0-6,7 | 394 | 6,04 | 0,012 | 4,86 | 0,02 | 0,38 | 0,48 | 0 |
| | 6,8-20 | 410 | 7,59 | 0,011 | 3,62 | 0,03 | 0,17 | 0,22 | 0 |

CE = condutividade elétrica; Eh = potencial redox; C.O.D. = carbono orgânico dissolvido.

Apêndice D. Valores de probabilidade de erro (p), das frações de matéria orgânica do solo, em duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores

| Variável | Camada | Manejo | Rotação | M x R |
|------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| MOP | 0-6,7 cm | 0,4618^{ns} | 0,1480^{ns} | 0,9968^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,4425 ^{ns} | 0,0904 ^{ns} | 0,4395 ^{ns} |
| MOM | 0-6,7 cm | 0,5404^{ns} | 0,7464^{ns} | 0,0602^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,4968 ^{ns} | 0,1228 ^{ns} | 0,3104 ^{ns} |
| MOS (da anal. MOP) | 0-6,7 cm | 0,5222^{ns} | 0,3702^{ns} | 0,2074^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,4747 ^{ns} | 0,0789 ^{ns} | 0,4238 ^{ns} |

M x R = interação entre os fatores tipos de manejo de solo e rotações de culturas.
MOP = fração da matéria orgânica particulada; MOM = fração da matéria orgânica associada aos minerais do solo; MOS = matéria orgânica total do solo.

Apêndice E. Valores de probabilidade de erro (p) dos atributos químicos da solução do solo, em duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores

| Variável | Camada | Manejo | Rotação | M x R |
|------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| pH | 0-6,7 cm | 0,0454* | 0,0404* | 0,0012** |
| | 6,8-20 cm | 0,5794 ^{ns} | 0,0816 ^{ns} | 0,4635 ^{ns} |
| Al³⁺ | 0-6,7 cm | 0,0078** | 0,0652^{ns} | 0,1573^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,4826 ^{ns} | 0,0688 ^{ns} | 0,6124 ^{ns} |
| Ca²⁺ | 0-6,7 cm | 0,0068** | 0,3765^{ns} | 0,2972^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,5425 ^{ns} | 0,6452 ^{ns} | 0,0699 ^{ns} |
| Mg²⁺ | 0-6,7 cm | 0,0674^{ns} | 0,1009^{ns} | 0,4968^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,5858 ^{ns} | 0,8959 ^{ns} | 0,0567 ^{ns} |
| K⁺ | 0-6,7 cm | 0,0427* | 0,3584^{ns} | 0,1856^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,4399 ^{ns} | 0,2680 ^{ns} | 0,0263* |
| Mn²⁺ | 0-6,7 cm | 0,0012** | 0,0985^{ns} | 0,1196^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0634 ^{ns} | 0,0635 ^{ns} | 0,2310 ^{ns} |
| NH₄⁺ | 0-6,7 cm | 0,0169* | 0,0000*** | 0,0002*** |
| | 6,8-20 cm | 0,1156 ^{ns} | 0,1432 ^{ns} | 0,1822 ^{ns} |
| COD | 0-6,7 cm | 0,0052** | 0,1114^{ns} | 0,2515^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0691 ^{ns} | 0,0132* | 0,0277* |
| NO₂⁻ | 0-6,7 cm | 0,5284^{ns} | 0,4924^{ns} | 0,8303^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,1870 ^{ns} | 0,2111 ^{ns} | 0,2767 ^{ns} |
| NO₃⁻ | 0-6,7 cm | 0,0083** | 0,7282^{ns} | 0,3799^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,9370 ^{ns} | 0,7067 ^{ns} | 0,3795 ^{ns} |
| PO₄³⁻ | 0-6,7 cm | 0,4310^{ns} | 0,4741^{ns} | 0,3680^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,7376 ^{ns} | 0,6578 ^{ns} | 0,8435 ^{ns} |
| SO₄²⁻ | 0-6,7 cm | 0,0538^{ns} | 0,1083^{ns} | 0,3353^{ns} |
| | 6,8-20 cm | 0,0873 ^{ns} | 0,0020** | 0,0573 ^{ns} |

M x R = interação entre os fatores tipos de manejo de solo e rotações de culturas.
COD = carbono orgânico dissolvido na solução do solo.

Apêndice F. Doses, fórmulas e modo de aplicação de fertilizantes, nos últimos cinco anos, nas culturas de verão e inverno dos tratamentos referentes ao experimento

| ano | Inverno | | | | | Verão | | | | | |
|------|---------|------|---------|---------|--------|---------|---------|------|---------|------|---------|
| | cultura | dose | fórmula | cobert. | dose N | ano | cultura | dose | fórmula | dose | fórmula |
| 2003 | T/Ab | 300 | 5-25-25 | Uréia | 45 | 2003/04 | S/Sg | 270 | 0-25-25 | 270 | 5-25-25 |
| 2004 | T/Ab | 300 | 5-25-25 | Uréia | 65 | 2004/05 | S/Sg | 250 | 0-25-25 | 300 | 5-25-25 |
| 2005 | T/Ab | 275 | 5-25-25 | Uréia | 30/65 | 2005/06 | S/Sg | 250 | 0-25-25 | 250 | 5-25-25 |
| 2006 | T/Ab | 250 | 5-25-25 | Uréia | 35/45 | 2006/07 | S/Sg | 250 | 0-25-25 | 250 | 5-25-25 |
| 2007 | T/Ab | 250 | 5-25-25 | Uréia | 30 | - | - | - | - | - | - |

T = trigo; Ab = aveia branca; S = soja; M = milho; Sg = sorgo. A soja foi inoculada anualmente. M e Sg sempre cultivados após ervilhaca. A ervilhaca recebeu inoculante específico. Fonte: Embrapa Trigo. Relatórios de Pesquisa do projeto – 2004 a 2008.

Apêndice G. Valores de probabilidade de erro (p) do percentual e da atividade de formas do Al da solução do solo, em duas camadas de um Latossolo Vermelho distrófico em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores

| Variável | Camada | Manejo | Rotação | M x R |
|--|-----------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| Al ³⁺ (%) | 0-6,7 cm | 0,0154* | 0,0024** | 0,0045** |
| | 6,8–20 cm | 0,2060 ^{ns} | 0,4598 ^{ns} | 0,5735 ^{ns} |
| AlOH ²⁺ (%) | 0-6,7 cm | 0,0033** | 0,0080** | 0,0553^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,0870 ^{ns} | 0,5020 ^{ns} | 0,9494 ^{ns} |
| Al(OH) ₂ ⁺ (%) | 0-6,7 cm | 0,0026** | 0,0189* | 0,0009*** |
| | 6,8–20 cm | 0,2286 ^{ns} | 0,3337 ^{ns} | 0,8841 ^{ns} |
| Al DOM (%) | 0-6,7 cm | 0,0013** | 0,3217^{ns} | 0,2431^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,1100 ^{ns} | 0,2017 ^{ns} | 0,0893 ^{ns} |
| Al tóxico (%) | 0-6,7 cm | 0,0067** | 0,0047** | 0,2101^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,0783 ^{ns} | 0,8570 ^{ns} | 0,7922 ^{ns} |
| Al ³⁺ (ativ.) | 0-6,7 cm | 0,0144* | 0,0301* | 0,0354* |
| | 6,8–20 cm | 0,3469 ^{ns} | 0,1940 ^{ns} | 0,6108 ^{ns} |
| AlOH ²⁺ (ativ.) | 0-6,7 cm | 0,0089** | 0,0110* | 0,0865^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,1634 ^{ns} | 0,2493 ^{ns} | 0,6226 ^{ns} |
| Al(OH) ₂ ⁺ (ativ.) | 0-6,7 cm | 0,0043** | 0,0053** | 0,0175* |
| | 6,8–20 cm | 0,0682 ^{ns} | 0,3106 ^{ns} | 0,7507 ^{ns} |
| Al DOM (ativ.) | 0-6,7 cm | 0,0175* | 0,3725^{ns} | 0,2170^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,2167 ^{ns} | 0,0968 ^{ns} | 0,7330 ^{ns} |
| Al tóxico (ativ.) | 0-6,7 cm | 0,0081** | 0,0145* | 0,0805^{ns} |
| | 6,8–20 cm | 0,2144 ^{ns} | 0,2333 ^{ns} | 0,6443 ^{ns} |

M x R = interação entre os fatores tipos de manejo de solo e rotações de culturas. (%) = percentual da forma de Al na solução do solo; (ativ.) = atividade da forma de Al na solução.

Apêndice H. Valores de probabilidade de erro (p) dos rendimentos de grãos, de matéria seca e de palha de culturas da safra 2007, conduzidas em um Latossolo Vermelho distrófico, em função do tipo de manejo, da rotação de cultura e da interação entre estes fatores

| Variável | Manejo | Rotação | M x R |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| RG trigo | 0,2335 ^{ns} | 0,0000*** | 0,2293 ^{ns} |
| RG aveia branca | 0,6769 ^{ns} | - | - |
| RG soja | 0,1345 ^{ns} | 0,3437 ^{ns} | 0,1827 ^{ns} |
| RG sorgo | 0,0247* | 0,8933 ^{ns} | 0,0972 ^{ns} |
| MS trigo | 0,2049 ^{ns} | 0,0032** | 0,9638 ^{ns} |
| MS aveia branca | 0,5235 ^{ns} | - | - |
| MS ervilhaca | 0,1188 ^{ns} | 0,5627 ^{ns} | 0,3309 ^{ns} |
| MS soja | 0,0042** | 0,3785 ^{ns} | 0,3437 ^{ns} |
| MS sorgo | 0,0004*** | 0,9198 ^{ns} | 0,3072 ^{ns} |
| RPalha - manejo | 0,0019** | - | - |
| RPalha - rotação | - | 0,0000*** | - |

M x R = interação entre os fatores tipos de manejo de solo e rotações de culturas.
 RG = rendimento de grãos; MS = massa da matéria seca; RPalha = rendimento de palha (MS – RG).