

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICO-MECÂNICOS E MINERALÓGICOS DE UM
ARGISSOLO VERMELHO SUBMETIDO A MANEJOS DE SOLO SOB
PLANTIO DIRETO**

**Sidinei Leandro Klöckner Stürmer
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICO-MECÂNICOS E MINERALÓGICOS DE UM
ARGISSOLO VERMELHO SUBMETIDO A MANEJOS DE SOLO SOB
PLANTIO DIRETO**

SIDINEI LEANDRO KLÖCKNER STÜRMER
Engenheiro-Agrônomo (UFSM)
Mestre em Ciência do Solo (UFSM)

Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Setembro de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

PAGINA DE HOMOLOGAÇÃO

*Não só hoje, mas todos os dias
Penso em ti com meu carinho
Ao ver-me forte, cheio de vida
Devo a ti que me guiaste.*

*Deu-me a vida
Ensinou-me a vivê-la
Dos problemas resolvê-los
Durante os medos me deste as mãos
Fazendo calmo meu coração.*

*Muitas vezes
Não só Mãe foste pra mim
Pai, amigo, irmão, companheira nas brincadeiras.*

*Sempre davas um jeitinho
De poder me acompanhar.
Segurou as minhas mãos
Me mostrando o caminho a seguir*

*Hoje sei como sofreste
Quando enfim soltou-me as mãos
Para que eu seguisse em frente.*

*Hoje sei
Que aplaude meus sucessos
Se entristece com meu pranto
Sei também que sempre estás
De braços abertos a me esperar.*

*Quero hoje minha Mãe
Te dizer de coração
Peço a Deus que te abençoe
Sempre em minha oração*

*E te abraço hoje e sempre
Com muito Amor e Gratidão.*

*A minha Mãe, hoje longe, mas sempre perto
por todo o amor, carinho e compreensão
com meu coração aberto,
a ti **DEDICO** este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, Renito José Stürmer, Maria Edi Klöckner Stürmer (*in memoriam*) e Júnior Klöckner Stürmer, por todo o carinho envolto em nossas relações e por nunca terem medido esforços para me dar condições de chegar até este tão esperado momento de minha vida;

À minha namorada Francieli Steffler Weber, uma das verdadeiras inspirações de minha vida;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de Doutorado;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense – Câmpus Rio do Sul, pela disponibilização de espaço físico e temporal durante a etapa final de conclusão do Doutorado;

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos;

Ao meu orientador Professor Renato Levien, agradeço por todos os conhecimentos conjuntamente construídos. Ao professor Fabrício de Araújo Pedron, cuja amizade e companheirismo tiveram início nos estudos dos materiais saprolíticos do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul; ao professor Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki, ex-colega de trabalho e estudos no laboratório de Física do Solo da UFSM; e ao professor Carlos Gustavo Tornquist, pelas sugestões, correções e conhecimentos auferidos durante o processo de qualificação ao doutorado e defesa do trabalho de tese;

Ao professor Paulo César do Nascimento pela co-orientação dos trabalhos objetos desta tese;

Aos professores que contribuíram para a minha formação científica, humana e social durante a realização do curso de Doutorado, em especial aos grandes amigos Élvio Giasson e Carlos Ricardo Trein, a quem admiro profundamente, mormente pelo seu senso de humildade e humanidade;

À professora Elena Setelich, colega do Instituto Federal Catarinense – Câmpus Rio do Sul, e ao grande amigo Douglas Rodrigo Kaiser, sempre disposto a ajudar, pela colaboração nas discussões e análises estatísticas.

À Estação Experimental Agronômica da UFRGS e seus servidores Ozébio e Celso pela colaboração nos trabalhos de campo; ao Luiz Antonio da

Silveira (Tonho), pelas determinações laboratoriais e ao Jader Ribeiro Amaro (Secretário do PPGCS), pela dedicação e competência no trabalho;

Aos meus colegas de estudo e pesquisa do grupo de mecanização e conservação do solo que em muito colaboraram para a realização deste trabalho. Letícia Sequinatto, Michael Mazzurana, Jonatan Müller, Tatiane Bagatini, Osmar Conte, Diane Alba além do amigo de longa data, Jessé Rodrigo Fink, sempre disposto a colaborar, parte desta obra a vós também pertence;

Ao grande amigo e colega de churrascos (vários), o Secretário do Departamento de Solos, Paulo Ricardo da Luz. Sua alegria no dia-a-dia contagiou e deixou-me mais disposto a enfrentar as dificuldades do cotidiano;

Aos meus amigos e colegas de curso Marquel Jonas Holszchuch, Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade Costa, Felipe Carmona, Christina Venzke Simões de Lima, Daniela Bueno Piaç Barbosa e Rosele Clairete dos Santos. Obrigado pela amizade e pelos momentos compartilhados;

Ao Ian e Sophie Giasson, além do Lupi, que deixaram meus momentos de descanso mais agradáveis;

A todos que contribuíram para a execução do trabalho e meu crescimento crítico-social e gostariam de receber palavras de agradecimento, mas infelizmente não foram citados, o agradecimento fica no convívio que tivemos;

Por fim, mas não menos importante, a todo o povo honesto, trabalhador e ético que nunca deixa de lutar por um Brasil melhor;

A todos vocês, um sincero MUITO OBRIGADO.

ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICO-MECÂNICOS E MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO SUBMETIDO A MANEJOS DE SOLO SOB PLANTIO DIRETO ^{1/}

Autor: Sidinei Leandro Klöckner Stürmer
Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

RESUMO

A utilização do sistema de plantio direto (SPD) no Brasil teve início na década de 70, com acentuado aumento a partir da década de 90, dando ênfase aos aspectos de redução de custos e uso de agroquímicos, rotação de culturas, utilização de plantas de cobertura e diferentes formas de adubação. Atualmente o sistema plantio direto representa o manejo conservacionista de solo mais adotado no País, totalizando aproximadamente 30 milhões de hectares cultivados. Especula-se, no entanto, que parte significativa dessa área não atenda aos requisitos básicos exigidos pelo sistema. Em muitas áreas o uso de rotação de culturas ainda é incipiente, enquanto que noutras a cobertura do solo com palha está aquém do recomendado, além de diversos outros problemas encontrados. Além disso, observam-se ainda com certa frequência a instabilidade da produção agrícola e frustrações de safra. Esses problemas podem estar associados à acentuada estratificação química e física do perfil do solo. Essa disposição estratificada do perfil do solo é devida principalmente ao manejo, que atua diretamente na estrutura do solo, afetando a sua densidade e porosidade. Na camada superficial pode ser expressa pela concentração de nutrientes e raízes e, na camada subsuperficial, pela degradação física da estrutura do solo. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo avaliar alguns atributos químicos, físico-mecânicos e mineralógicos de um Argissolo Vermelho em experimento de longa duração com SPD, sob diferentes manejos de culturas, adubação e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras da semeadora. Foram determinadas a concentração de nutrientes, CTC, acidez, teor e estoque de carbono orgânico, granulometria, densidade, porosidade, resistência mecânica à penetração, limites de Atterberg, mineralogia, mobilização do solo, demanda de tração da haste sulcadora e produtividade das culturas de inverno e verão. Os resultados obtidos apontam que o solo apresenta acentuada estratificação dos principais atributos químicos do solo, principalmente na camada superficial até 0,10 m de profundidade. Os atributos físicos do solo não são profundamente afetados pelos sistemas de manejo das culturas hibernais e da adubação, enquanto que os atributos mecânicos, em especial os relacionados ao tráfego de rodados e atuação das hastes sulcadoras, são dependentes do manejo e afetam a produtividade das culturas. Após 10 anos de conversão do uso do solo de campo nativo para área sob SPD os atributos mineralógicos apresentam pequenas modificações.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (165 p.) Setembro, 2012. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

**CHEMICAL, PHYSIC-MECHANICAL AND MINERALOGICAL SOIL
ATTRIBUTES OF A PALEUDULT SUBMITTED TO SOIL MANAGEMENT
UNDER NO TILLAGE ^{1/}**

Author: Sidinei Leandro Klöckner Stürmer
Adviser: Prof. Dr. Renato Levien

ABSTRACT

The no till in Brazil had beginning during the 1970's, with accentuated increase in 90's, feeling emphasis to the reduction of costs and pesticide`s use, crop rotation, covering plants use and soil management forms. At the moment, the no till system represents the conservation soil management system more adopted in our country, with approximately 30 million land hectares cultivated. However, it is speculated that significant amount area doesn't assist to the basic requirements demanded by the system. In some areas the crop rotation is still incipient, while in other, the soil covering with straw is smaller that the recommended, among other several problems. Besides, are frequently observed the agricultural production instability and yeld production frustrations. Those problems can be strongly associated to accentuated chemical and physical stratification from the soil profile. That soil profile stratified disposition is owed mainly to the management that directly acts in the soil structure, affecting the soil density and porosity. Still, the stratification can be expressed, in the surface layer, by the nutrients and roots concentration and, in the subsurface layer, by the soil physical structure degradation. In this sense, this work had for objective to evaluate some chemical, physical-mechanics and mineralogical attributes of a Paleudul in a no till long time experiment, under crops management, fertilization and working depth of the seed drill furrow openers. Were evaluated the nutrients concentration, CTC, acidity, organic carbon content and storage, particle size distribution, density, porosity, soil mechanical penetration resistance, Atterberg limits, mineralogy, soil mobilization, draft requirement on the seed drill furrow openers and summer and winter crops productivity, among others. The obtained results show that the soil presents marked stratification of the main chemical attributes, mainly in the soil surface layer. The soil physical attributes were not deeply affected by the winter crops management systems, and by the fertilization, while the mechanical attributes, especially, the related to the wheeled traffic and seed drill furrow openers working depth are management dependent and affect the crop productivity. After 10 years of land use conversion from native grassland to SPD the mineralogical attributes show small modifications.

^{1/} Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (165 p.) September, 2012. Financial support by CNPq.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CAPÍTULO I. EVOLUÇÃO E ESTADO DA ARTE DO SISTEMA PLANTIO DIRETO NA AGRICULTURA.....	5
2.1 Histórico do sistema plantio direto no Brasil.....	5
2.2 Fases do sistema plantio direto.....	8
2.3 Situação atual do sistema plantio direto e problemas emergentes	10
3 CAPÍTULO II. EVOLUÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM SISTEMA DE TRANSIÇÃO DO USO DO SOLO DE CAMPO NATURAL PARA ÁREA PRODUTORA DE GRÃOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO	17
3.1 Introdução	17
3.2 Material e Métodos.....	20
3.2.1 Localização e histórico da área experimental.....	20
3.2.2 Tratamentos.....	22
3.2.3. Análises químicas.....	25
3.2.4 Análise estatística.....	27
3.3 Resultados e Discussão.....	28
3.3.1 Teor de nutrientes, CTC e acidez	28
3.3.2 Teor e estoque de carbono orgânico total do solo.....	42
3.4 Conclusões.....	47
4. CAPÍTULO III. EVOLUÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICO-MECÂNICOS EM UM SISTEMA DE TRANSIÇÃO DE CAMPO NATURAL PARA ÁREA SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	48
4.1 Introdução	48
4.2 Material e Métodos.....	51
4.2.1 Área experimental.....	51
4.2.2 Tratamentos.....	51
4.2.3 Máquinas e implementos agrícolas.....	53
4.2.4 Análises físico-mecânicas.....	54
4.2.5 Análise estatística.....	63
4.3 Resultados e Discussão.....	63
4.3.1 Análises físicas	63
4.3.2 Análises mecânicas	84
4.4 Conclusões.....	87
5. CAPÍTULO IV. ATRIBUTOS MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO EM EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO.....	88
5.1 Introdução	88

5.2	Material e Métodos.....	91
5.2.1	A área experimental.....	91
5.2.2	Tratamentos.....	91
5.2.3	Análises mineralógicas.....	92
5.2.4	Análise estatística.....	93
5.3	Resultados e Discussão.....	93
5.3.1	Análises mineralógicas.....	93
5.4	Conclusões.....	100
6	CAPÍTULO V. PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE VERÃO INFLUENCIADA PELOS ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICO-MECÂNICOS E MINERALÓGICOS DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO	101
6.1	Introdução	101
6.2	Material e Métodos.....	105
6.2.1	A área experimental.....	105
6.2.2	Tratamentos.....	107
6.2.3	Fitomassa verde e seca da parte aérea das culturas de cobertura do solo de inverno	107
6.2.4	Produtividade das culturas de verão.....	108
6.2.5	Dados meteorológicos	109
6.2.6	Análise estatística.....	109
6.3	Resultados e Discussão.....	110
6.3.1	Fitomassa verde e seca da parte aérea das culturas de cobertura do solo de inverno	117
6.4	Conclusões.....	127
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
9	APÊNDICES	155

RELAÇÃO DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1. Distribuição dos tratamentos de sistemas de culturas e adubação e irrigação nas parcelas experimentais.....	24
Tabela 2. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento. Eldorado do Sul-RS, 2000.....	26
Tabela 3. Carbono orgânico total (g kg^{-1}) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	43
Tabela 4. Estoque de carbono orgânico (Mg ha^{-1}) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	45
Tabela 5. Distribuição granulométrica em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	53
Tabela 6. Argila dispersa em água em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	64
Tabela 7. Densidade do solo em quatro camadas sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	67
Tabela 8. Porosidade total em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	69
Tabela 9. Macroporosidade em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	70
Tabela 10. Microporosidade em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	72
Tabela 11. Limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	73

Tabela 12. Área da seção transversal (cm ²) do sulco produzido pela haste sulcadora para adubo em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	84
Tabela 13. Demanda de tração (N) requerida em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	85
Tabela 14. Demanda de tração específica (N cm ⁻²) requerida em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	86
Tabela 15. Ferro em formas de baixa cristalinidade extraído com oxalato de amônio (Feo) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	95
Tabela 16. Ferro presente nos óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (Fed) extraído com solução de ditionito, citrato e bicarbonato em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	96
Tabela 17. Relação entre os teores de ferro presente nos óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (Fed) e os teores de ferro em formas de baixa cristalinidade (Feo) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.....	97
Quadro 1. Espécies hibernais de cobertura do solo predominantes na área experimental, de acordo com o tratamento, nas safras agrícolas de 2008/2009 e 2009/2010. Eldorado do Sul, 2009.....	106
Tabela 18. Fitomassa seca da parte aérea produzida pelas plantas de	

cobertura do solo implantadas no inverno. Eldorado do Sul - 2008.....	117
Tabela 19. Fitomassa verde e seca produzida aos 68 e 111 dias após a semeadura (DAS) pelas plantas de cobertura do solo implantadas no inverno. Eldorado do Sul – 2009.....	121
Tabela 20. Produtividade (kg ha ⁻¹) da cultura do milho em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Safra 2008/2009. Eldorado do Sul – 2009.....	123
Tabela 21. Produtividade (kg ha ⁻¹) da cultura da soja em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Safra 2009/2010. Eldorado do Sul – 2010.....	125

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental na EEA-UFRGS, Eldorado do Sul-RS, Brasil. Fonte: Google Earth®.....	21
Figura 2. Croqui da área do estudo original. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul-RS, Brasil.....	23
Figura 3. pH do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo. As barras verticais vermelhas são linhas indicativas dos valores de referência, segundo os critérios de CQFS-NRS (2004).....	30
Figura 4. Acidez potencial do solo ($H+Al^{+3}$) sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.....	32
Figura 5. Capacidade de troca de cátions (CTC) sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo. As barras vermelhas verticais delimitam as classes de CTC citadas por CQFS-NRS (2004).....	33
Figura 6. Teor de potássio (K) no solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de	

culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.....	35
Figura 7. Teor de fósforo (P) no solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.....	38
Figura 8. Saturação do solo por bases (V) sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.	41
Figura 9. Localização das hastes sulcadoras da semeadora com indicação dos tratamentos secundários avaliados no experimento. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.....	52
Figura 10. Esquema de determinação da resistência mecânica à penetração em transectos transversais às linhas de semeadura, com espaçamento de 0,05m entre as amostragens. Eldorado do Sul, 2009..	59
Figura 11. Vista frontal do perfilômetro instalado transversalmente ao sulco de semeadura. Eldorado do Sul, 2010.....	60
Figura 12. Instrumentação das hastes sulcadoras da semeadora-adubadora, com detalhes da instalação dos estensômetros de resistência elétrica (<i>strain gages</i>) para determinação da demanda de tração.....	62
Figura 13. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com rotação de culturas e adubação química (PD1), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação	

rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora..... 76

Figura 14. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com sucessão de culturas e adubação química (PD2), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora..... 78

Figura 15. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área mantida sob pousio invernal e adubação química (PD3), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora..... 80

Figura 16. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com sucessão de culturas e adubação orgânica (PD4), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego

dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.....	81
Figura 17. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com rotação de culturas e adubação orgânica (PD5), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.....	83
Figura 18. Relação entre os teores de carbono orgânico total em distintos manejos do solo e os teores de ferro em óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (a) e de baixa cristalinidade (b). Eldorado do Sul – 2010.....	99
Figura 19. Precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração potencial referentes ao período de desenvolvimento da cultura do milho, na safra 2008/2009. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS.....	113
Figura 20. Precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração potencial referentes ao período de desenvolvimento da cultura da soja, na safra 2009/2010. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS.....	114

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice 1. Descrição morfológica geral do solo estudado.....	156
Apêndice 2. Quantidades cumulativas dos elementos N, P, K, C orgânico e de equivalente CaCO ₃ aplicadas no período de 2000-2010 para os tratamentos com adubação mineral e orgânica e sistemas de culturas. Eldorado do Sul, 2010.....	157
Apêndice 3. Caracterização química da cama de aviário (três lotes) utilizada como fertilizante orgânico e quantidades totais de elementos aportados no período de 2000-2010 para os tratamentos com adubação orgânica. Eldorado do Sul, 2010.....	158
Apêndice 4. Análise química do solo no início do experimento nas glebas I e II. Eldorado do Sul-RS, 2000.....	159
Apêndice 5. Análise química do solo no início do experimento nas glebas III e IV. Eldorado do Sul-RS, 2000.....	160
Apêndice 6. Análise química do solo no início do experimento nas glebas V e VI. Eldorado do Sul-RS, 2000.....	161
Apêndice 7. Análise química do solo no início do experimento na gleba VIII. Eldorado do Sul-RS, 2000.....	162
Apêndice 8. Análise química do solo nos tratamentos PD1 e PD2, após dez anos da implementação dos distintos manejos de culturas e adubação. Eldorado do Sul-RS, 2010.....	163
Apêndice 9. Análise química do solo nos tratamentos PD3 e PD4, após dez anos da implementação dos distintos manejos de culturas e adubação. Eldorado do Sul-RS, 2010.....	164
Apêndice 10. Análise química do solo nos tratamentos PD5 e CN, após dez anos da implementação dos distintos manejos de culturas e adubação. Eldorado do Sul-RS, 2010.....	165

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão abordados alguns dos principais aspectos relacionados a uma das mais importantes revoluções que tiveram início, e que continuam a ocorrer no âmbito da agricultura brasileira. A temática desta obra se refere a uma revolução que envolve animais, máquinas, um povo, seus conhecimentos prévios e seus ideais. É a revolução do sistema plantio direto (SPD) no Brasil.

O cenário observado nas lavouras brasileiras no início da década de 70, principalmente nas áreas cultivadas pela sucessão trigo/soja nos planaltos dos Estados do Sul do Brasil, mormente nas unidades federativas do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná era estarrecedor. As áreas já em cultivo sofriam acentuada degradação química e física, desencadeadas principalmente pelo quadro socioeconômico, cultural e pelo inadequado uso e manejo dos recursos naturais. O uso intenso e revolvimento excessivo do solo por meio das operações agrícolas, associados à alta erosividade da chuva, provocaram grande mineralização da matéria orgânica, o que tornava os solos vulneráveis à erosão hídrica em intensidade muito alta.

Devido ao intenso e incorreto uso antrópico do solo, por meio da erosão hídrica, grande quantidade de solo e fertilizantes eram transportados para fora das lavouras e depositados nos leitos de água, empobrecendo todo o ecossistema agrícola.

Quase ao final da década de 70, mais precisamente no ano de 1978, um fato histórico conhecido no Rio Grande do Sul (RS) como “Novembro Vermelho”, com a ocorrência de elevadas precipitações e com alta intensidade,

em período de solo descoberto, associada à intensa erosão hídrica, marcou a memória de muitos agricultores, órgãos governamentais e páginas de livros e jornais. O prejuízo financeiro, na época, foi estimado em aproximadamente U\$ 33 milhões, devido às perdas com sementes, fertilizantes e mão de obra. O prejuízo ambiental, por sua vez, esteve relacionado à perdas médias de 97 toneladas de solo por hectare, formação de imensas voçorocas e acentuada coloração das águas dos rios.

Nessas condições de degradação ambiental e financeira das unidades de produção, tornou-se imperativa a busca pela qualidade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, com vistas à conservação dos recursos do ecossistema. Nesse sentido, sistemas conservacionistas se constituíram em importantes vetores de mudança e da evolução em busca da sustentabilidade, reconhecendo-se as necessidades das futuras gerações.

A fim de combater a erosão e melhorar o manejo e a conservação do solo no RS, teve início em 1979 o Projeto Integrado de Uso e Conservação do Solo (PIUCS). O projeto governamental primava pela eliminação da queima da palhada sobre o solo, introdução de culturas de cobertura durante o período de inverno, redução do tráfego de rodados de máquinas sobre o solo, enfoque do uso da terra em microbacias e substancial redução do revolvimento do solo, dando início ao uso de sistemas conservacionistas como o cultivo mínimo e, mais tarde ao sistema plantio direto.

De meados da década de 70 até meados da década de 90 a área com plantio direto no Brasil passou por sucessivos ciclos de expansão/redução devido a restrições manifestadas ao nível de agricultor e assistência técnica, como a insuficiência de conhecimentos, baixa qualidade das máquinas, do controle de ervas, e da rotação das culturas. Com a superação da maioria dos problemas tecnológicos, por meio da multifuncionalidade das semeadoras, utilização de novos herbicidas, melhoramento genético das plantas, reavaliação da necessidade de realocação dos terraços, e a crescente preocupação com o ambiente, o sistema plantio direto ocupa, atualmente, uma área estimada de aproximadamente 30 milhões de hectares cultivados.

Devido às mudanças ocorridas nesse período, observa-se hoje nas lavouras do Sul, bem como no restante do país, a diminuição da mobilização do solo, o uso de adubos verdes e diversificação das espécies cultivadas, a

manutenção do solo coberto por plantas a maior parte do ano e o manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas. Outrossim, pesquisas desenvolvidas pela comunidade científica, concluem que o sistema plantio direto melhora consideravelmente a estrutura de solos degradados.

Em contrapartida, com a evolução das áreas de lavoura sob SPD no Brasil, emergem alguns problemas como a compactação dos solos induzida pelo tráfego de máquinas agrícolas e a estratificação química e física dos atributos do solo em profundidade, além da concentração de raízes próximo à superfície do solo, o que tem promovido instabilidades da produção agrícola e frustrações de safra.

Como a dinâmica dos nutrientes, a estrutura física dos solos e a compactação têm relação direta com as práticas de manejo adotadas dentro do sistema, surgem diversas teorias e indagações acerca de como os diferentes manejos do solo, das culturas e da adubação, mormente em SPD atuam sobre os atributos químicos, físicos, mecânicos e mineralógicos do solo e sobre a produtividade das culturas.

Nesse sentido, o objetivo geral desta pesquisa foi estudar o efeito, em superfície e subsuperfície, do manejo das culturas de cobertura no inverno, da adubação e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras de semeadora sobre os atributos químicos, físico-mecânicos e mineralógicos em um Argissolo Vermelho num experimento de longa duração sob sistema plantio direto e sobre o rendimento das culturas de inverno e de verão.

Assim, embora dividido em capítulos, neste documento procura-se realizar uma abordagem sistêmica sobre alguns atributos químicos, como a concentração de nutrientes, CTC, acidez, teor e estoque de carbono orgânico; atributos físicos, como a granulometria, argila dispersa em água, densidade, porosidade, limites de Atterberg, resistência mecânica à penetração, atributos mineralógicos, como os teores de ferro presentes no solo e sua relação com o carbono orgânico; e atributos mecânicos, como a mobilização do solo, e demanda de tração da haste sulcadora. Por fim, estes atributos serão relacionados com a produtividade das culturas hibernais de cobertura do solo e com a produtividade das culturas de verão.

No primeiro capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre a evolução e estado da arte do SPD na agricultura brasileira. Nos dois capítulos

seguintes, uma abordagem sobre a evolução dos atributos químicos e físico-mecânicos em um sistema de transição do uso do solo de campo natural para área produtora de grãos sob SPD. Já no capítulo IV serão abordados alguns atributos mineralógicos de solo SPD em experimento de longa duração, e por fim serão apresentados aspectos de como a produtividade das culturas é influenciada pelos atributos químicos, físico-mecânicos e mineralógicos do solo sob SPD, buscando-se relações existentes entre todos os componentes do sistema para que seja possível entender melhor os processos que ocorrem no complexo e dinâmico ambiente do solo.

2 CAPÍTULO I. EVOLUÇÃO E ESTADO DA ARTE DO SISTEMA PLANTIO DIRETO NA AGRICULTURA

2.1 Histórico do sistema plantio direto no Brasil

A utilização do sistema plantio direto (SPD) no Brasil teve início na década de 70, tendo seu pico no final desta década e no início dos anos 80, nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul, como forma de substituição do sistema de preparo do solo anteriormente vigente, o preparo convencional (Mielniczuk et al., 2003). Hoje, com suporte de vários trabalhos de pesquisa, sabe-se que o SPD pode reduzir em até 75% as perdas de solo e em até 22% as perdas de água, quando comparados com o sistema convencional de preparo do solo, anteriormente predominante nas lavouras (Borges Filho, 2001).

O SPD foi implantado principalmente com o objetivo de controlar a erosão em lavouras cultivadas quase que exclusivamente pela sucessão trigo/soja (Borges Filho, 2009). O preparo convencional caracterizava-se pelo revolvimento intenso do solo, uma ou duas vezes ao ano, com incorporação das culturas anteriores, deixando o solo praticamente descoberto na fase de implantação e desenvolvimento inicial das culturas. Essa prática, que foi trazida ao Brasil de regiões temperadas, mostrou-se a principal causa da degradação dos solos em virtude da deterioração da estrutura do solo devido à redução da matéria orgânica por meio de intensa mineralização e pelo favorecimento dos processos erosivos no solo (Derpsch et al., 1991; Bayer et al., 2000).

Como o solo é base dos sistemas de produção agrícola, afetando a sustentação do crescimento vegetal, e, conseqüentemente, o rendimento de culturas, o manejo convencional do solo acabava por causar impactos negativos para a produção agrícola. Nessas condições de degradação ambiental, tornou-se imperativa a busca pela qualidade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, com vistas à conservação dos recursos do ecossistema. Nesse sentido, sistemas conservacionistas se constituíram em importantes vetores de mudança e da evolução em busca de melhorar a estrutura física do solo, a fim de este ser capaz de exercer as suas funções para o crescimento e ancoragem das raízes, bem como favorecer o suprimento de água, nutrientes e oxigênio às plantas (Blainski et al., 2008).

Até o final da década de 80 e início dos anos 90 as principais dificuldades enfrentadas para implantação do sistema estavam relacionadas à falta de máquinas adequadas para semeadura direta, o alto custo financeiro desses equipamentos e insuficientes informações técnicas acerca do sistema, destacando-se principalmente, o controle das plantas daninhas (ABEAS, 2005; Lal et al., 2007).

Ao mesmo tempo em que se tentava resolver os problemas inerentes ao novo sistema de preparo do solo, as instituições de pesquisa iniciavam esforços centrados no estudo do manejo das plantas daninhas e nos efeitos da semeadura direta sobre a erosão e sobre as características do solo, bem como sobre a produção das culturas (Denardin, 1997). Lal (2001) em levantamento sobre a evolução temática das pesquisas da International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) de 1955 ao ano 2000 identificou algumas grandes linhas de pesquisas apresentadas em reuniões da ISTRO. Até o início da década de 80 as principais pesquisas estavam baseadas na aração do solo e na mecanização (década de 50 e 60) e em sistemas conservacionistas de manejo do solo (década de 70).

Como se percebe, a adoção de sistemas conservacionistas tomou âmbito mundial até meados dos anos 80. Nessa época destacou-se a região dos Campos Gerais do Paraná, tanto pela área plantada como pelas inovações tecnológicas, transformando-se num pólo irradiador do SPD para os demais estados brasileiros e para outros países da América do Sul (Mielniczuk et al., 2003).

Nos anos subseqüentes, houve um grande desenvolvimento das máquinas para o SPD, por instituições de pesquisa, agricultores individuais e indústrias (ABEAS, 2005). Também passou a se utilizar o SPD em pequenas propriedades, em função do desenvolvimento de máquinas de tração animal ou mesmo para semeadura manual adaptadas ao sistema. Na metade da década de 80, a região do Planalto do Rio Grande do Sul teve uma grande evolução na adoção do SPD. Nesta região, foi dada ênfase aos aspectos de redução de custos, buscando-se a redução da queima da palha, redução na mobilização do solo (Mielniczuk et al., 1983), redução do uso de agroquímicos, rotação de culturas, utilização de espécies para cobertura do solo e diferentes formas de adubação (Mielniczuk et al., 2003).

Muitas ações e projetos governamentais se sucederam daí em diante, se destacando o Projeto Integrado de Uso e Conservação do Solo (PIUCS), o Projeto Saraquá, o Programa Estadual de Microbacias Hidrográficas, e o Projeto de Viabilização e Difusão do Sistema Plantio Direto no Rio Grande do Sul (METAS), respectivamente a partir dos anos de 1979, 1980, 1984 e 1992 (Mielniczuk, 1999). Os grandes responsáveis pela introdução efetiva, manutenção e realização de mobilizações a favor do uso do sistema plantio direto nas lavouras foram os Clubes Amigos da Terra (CAT's), enquanto que o projeto METAS procurou gerar, adaptar e disponibilizar conhecimentos para a implantação e a continuidade do SPD em escala de lavoura (Denardin, 1998). Com a disponibilização de mecanização para pequenas e médias propriedades, principalmente de tratores e semeadoras de 2 a 5 linhas, houve um novo incremento na área semeada sob SPD (Casão Júnior et al., 2012)

Introduzido inicialmente como um método alternativo de preparo de solo, o SPD passou a ser entendido como um complexo de tecnologias destinadas à exploração de sistemas de produção, contemplando mobilização de solo apenas na linha de semeadura, manutenção permanente da cobertura do solo e diversificação de espécies, via rotação e/ou consorciação de culturas (Lal et al., 2007; Denardin et al., 2008). A partir do início dos anos 2000, surgiu a proposta de incorporação ao sistema mais um processo tecnológico para a promoção da estrutura do solo, o processo colher-semear, ou seja, a minimização do interstício entre colheita e semeadura (Denardin et al., 2008).

Esse processo incorporou ao SPD a propriedade de reproduzir, no sistema de produção, fluxos de aporte e mineralização de fitomassa semelhantes aos observados nos ecossistemas, isto é, fluxos permanentes e simultâneos de aporte e mineralização de material orgânico e absorção de nutrientes (Denardin & Kochhann, 2006). Nesse contexto, cerca de 4 milhões de hectares do Estado do Rio Grande do Sul, manejados sob esse sistema, têm, nos cereais de inverno, abundante fonte de fitomassa e flexibilidade sazonal capaz de viabilizar esse processo de modo conjugado às culturas de milho, soja, sorgo, feijão e pastagens. É essa interação de processos tecnológicos de enfoque holístico, contemplada pelo sistema plantio direto, que definitivamente contribui para imprimir caráter de sustentabilidade ao agroecossistema.

Apesar de o SPD ser usado no Brasil desde o início dos anos 70, seu maior crescimento aconteceu na década de 90, a partir da superação da maioria dos problemas tecnológicos inerentes, por meio da multifuncionalidade das semeadoras, utilização de novos herbicidas, melhoramento genético das plantas, reavaliação dos terraços, e a crescente preocupação com o ambiente (Duarte et al., 2007). No ano de 2000 o SPD já era utilizado em aproximadamente 80% das áreas cultivadas no RS (Mielniczuk et al., 2003). Atualmente o SPD representa o manejo conservacionista de solo e de culturas com maiores níveis de adoção no País. Huggins & Reganold (2008), apresentando dados da FAO de 2004, mostram que dos quase 95 milhões de hectares com SPD no mundo, aproximadamente 25 milhões de hectares cultivados sob este sistema estão no Brasil.

2.2 Fases do sistema plantio direto

Hoje, independentemente do tempo de adoção ou da forma como é manejado, dados não oficiais dão conta que o SPD é adotado em aproximadamente 30 milhões de hectares no Brasil. Em determinadas regiões, o nível de adoção do SPD já ultrapassa 90% da área cultivada, enquanto em outras, a área cultivada neste sistema continua aumentando sob altas taxas (Duarte et al., 2007). Há de se lembrar, no entanto, que se torna imprescindível analisar o tempo de utilização do sistema para que seus benefícios, como o

acúmulo de matéria orgânica, a agregação do solo e a ciclagem de nutrientes ocorram (Sá et al., 2004) e para mais adequadas conclusões acerca do tema.

De acordo com Anghinoni (2007) até os primeiros cinco anos de adoção do SPD nas lavouras, estas permanecem na fase inicial do sistema, onde os teores de carbono orgânico ainda se encontram em baixo nível, há um baixo acúmulo de palhada e um reestabelecimento das atividades dos microrganismos. Com um tempo de uso do sistema por cinco a dez anos, o sistema passa pela fase de transição. Nesta fase ocorre maior acúmulo de matéria orgânica, palhada e fósforo. Além disso, a imobilização de nitrogênio, um importante nutriente para a produção vegetal (Meurer, 2006) se torna maior que a mineralização deste. Ao mesmo tempo ocorre uma mais acentuada reagregação da matriz do solo. Na fase de consolidação, decorridos dez a vinte anos de adoção do SPD, ainda há acúmulo de palhada e matéria orgânica, ocorrendo ao mesmo tempo um aumento da CTC do solo e ciclagem de nutrientes. A imobilização do nitrogênio passa a ser menor que a mineralização e o armazenamento de água no solo aumenta principalmente em função da matéria orgânica e da estruturação do solo (Reynolds et al., 2002; Dalmago et al., 2009). Por fim, em lavouras com mais de vinte anos de adoção do SPD, que se encontram na fase de manutenção, há uma elevada ciclagem anual de nutrientes, uma menor necessidade de reposição de elevadas doses de fósforo e nitrogênio para as culturas, além de ocorrer um fluxo contínuo de carbono e nitrogênio.

Ao analisarmos os dados referentes à evolução das áreas sob SPD no Brasil (FEBRAPDP, 2010), percebemos que parte significativa destas áreas não se encontra dentro da definição proposta por Anghinoni (2007), como sendo áreas de SPD consolidado (mais de 10 anos de SPD). No ano de 2006 o Brasil possuía uma área de aproximadamente 24 milhões de hectares sob SPD. Se tomarmos o ano de 1996 como referência (10 anos antes) vê-se que neste período a área sob SPD no Brasil não ultrapassava 8 milhões de hectares. Assim sendo, 16 milhões de hectares de lavouras, o que representa 67% da área em SPD, não se encontra na fase de consolidação. Estendendo a análise, pode-se, da mesma forma, inferir que aproximadamente 8 milhões de hectares, no ano de 2006, ainda estavam na fase inicial do sistema, onde ainda não há expressivo aumento de matéria orgânica.

2.3 Situação atual do sistema plantio direto e problemas emergentes

Na medida em que o sistema passou a ser usado nas mais diversas regiões do país (semiárido, cerrados, região subtropical), em diferentes tipos de solo (arenosos a argilosos) e com diferenciados tipos de culturas (gramíneas, leguminosas), a diversidade de modos de condução e da qualidade do SPD aumentou consideravelmente (Amado, 2009).

No entanto, em relação às máquinas e implementos agrícolas podemos destacar que problemas quanto ao desempenho e alta resistência à penetração dos componentes rompedores têm exigido constante adaptação das máquinas (Siqueira, 2009). Os problemas mais freqüentemente reportados são o corte irregular da vegetação, embuchamentos, abertura inadequada dos sulcos, aderência do solo aos componentes, profundidade de semeadura desuniforme, cobertura deficiente do sulco de semeadura e contato inadequado do solo sobre as sementes.

Visando-se obter um bom desempenho na implantação das culturas foram desenvolvidos diferenciados sistemas de rompimento de solo, como os discos de corte (liso, estriado e ondulado), que tem a função de realizar o corte dos restos culturais, e abrir o sulco para deposição de sementes e fertilizantes; os discos duplos defasados, lisos ou recortados, que realizam o corte da palha e abertura do sulco para a colocação da semente e adubo; e a faca ou facão, também destinados a abrir sulco para colocação do adubo a maiores profundidades, assim como podem promover uma descompactação na linha de plantio (Casão Jr. & Siqueira, 2006).

Em áreas cultivadas sob SPD, associada à calagem, se realiza a fertilização das lavouras, que pode ser realizada na linha de semeadura ou a lanço na área total de cultivo. Nos últimos anos, alguns produtores têm optado pela aplicação do fertilizante a lanço, uma vez que esta otimiza as operações agrícolas e a mão-de-obra antes da semeadura das culturas comerciais (Ceretta & Pavinato, 2003; Rossato, 2008), sendo que a resposta das plantas a adubação é dependente da dose aplicada, da solubilidade do grânulo do fertilizante, do espaçamento da cultura, dos teores presentes no solo e da distribuição do sistema radicular das culturas (Barber, 1984; Ceretta &

Pavinato, 2003).

Similarmente, os tipos de fertilizantes aplicados podem variar de acordo com sua origem, orgânica ou mineral. Como o conceito de desenvolvimento sustentável, apesar de ter sua viabilidade bastante questionada no meio acadêmico, vem sendo incorporada por diversos setores da comunidade internacional (Sobral, 1999), a preocupação com o ambiente, com a alimentação saudável e com a necessidade de dar um destino apropriado às grandes quantidades produzidas em alguns países (Blaise et al., 2005; Salazar et al., 2005), a adubação orgânica tem retomado importância, nas últimas décadas, no cenário agrícola.

Nesse cenário, parte significativa de área cultivada sob SPD no país não atenda aos requisitos básicos exigidos pelo sistema. Na maioria das áreas é incipiente o uso de sistemas de rotação de culturas, enquanto que em outras a quantidade de cobertura do solo com palha está aquém do recomendado. Nesse sentido, o trabalho Rally da Safra – Estado da Arte do Plantio Direto (Agroconsult, 2010), fornece dados acerca da cobertura do solo em SPD. No ano agrícola de 2010-2011 a cobertura do solo na região Sul do país (RS, SC e parte do PR), ao final do ciclo da soja, não ultrapassava os 50%. Em contrapartida, regiões mais ao norte do país, onde há predominância de clima com inverno quente e semi-úmido ou até mesmo inverno quente e seco, os percentuais de cobertura do solo foram entre 34-35%. Este cenário pode ser explicado, em parte, pelas condições climáticas mais favoráveis à conservação dos resíduos culturais na região Sul do país, enquanto a decomposição destes resíduos é maior em condições de temperatura mais elevadas (Sá et al., 2004), e da classificação botânica das plantas de cobertura utilizadas nas diferentes regiões (Amado, 2009; Agroconsult, 2010).

Embora adotado em algumas lavouras há vários anos, o SPD ainda apresenta como problemas a instabilidade da produção agrícola e frustrações de safra, motivadas por déficit hídrico, quando da ocorrência de pequenos períodos sem chuva. Esse problema pode estar fortemente associado à acentuada estratificação química e física do perfil do solo (Denardin et al., 2008). Essa disposição estratificada do perfil do solo pode ocorrer em função do preparo, pois este atua diretamente na estrutura do solo, que tende a diferenciar-se das condições naturais do solo, piorando com o passar do

tempo, em manejos inadequados (Anjos et al., 1994). Em áreas sob SPD, a estratificação é expressa na camada superficial do solo, pela concentração de nutrientes e favoráveis condições físicas para o desenvolvimento de raízes nessa camada (Costa, 2008), e, na camada subsuperficial, pela degradação física da estrutura do solo, expressa pelo aumento da densidade e da resistência do solo à penetração; e redução da permeabilidade do solo ao ar e à água, em decorrência da diminuição da porosidade total, especialmente da macroporosidade do solo (Reichert et al., 2007). Denardin et al. (2008) em avaliações de amostras de solo coletadas em lavouras sob SPD com elevado teor de argila, detectaram nítida degradação e estratificação química e física dos 0,20 m superficiais do solo e concluíram que a camada subsuperficial do solo, de 0,05 a 0,20 m de profundidade, é cerca de 40 a 45% mais densa do que a camada superficial, localizada de 0 a 0,05 m de profundidade; a camada subsuperficial do solo, apresenta cerca de 2 a 3 vezes menos macroporosidade do que a camada superficial, e resistência do solo à penetração superior a 2 MPa, isto é, resistência cerca de 4 vezes maior do que a da camada superficial, em condições de umidade equivalente a 6 kPa.

As principais causas da degradação da estrutura física dos solos pela sua compressão são o pisoteio animal sob integração lavoura-pecuária (Trein et al., 1991; Bertol et al., 2000; Silva et al., 2000) e do tráfego intenso de máquinas agrícolas sob umidade inadequada (Novak et al., 1992; Tormena et al., 1998; Canillas & Salokhe, 2001). Sabe-se que a compactação superficial do solo pelo tráfego de máquinas depende da pressão de contato pneu/solo, enquanto que a subsuperficial está relacionada ao peso sobre os rodados (Sánchez-Girón, 1996; Raper, 2005). Neste sentido, Sánchez-Girón (1996) considera que a compactação só ocorre se a tensão exercida pelos rodados ultrapassar a resistência do solo à deformação. As propriedades mecânicas do solo também influenciam na compactação. Solos com menor resistência à deformação permitem um maior recalque dos rodados, aumentado, dessa forma, a área de contato (Sánchez-Girón, 1996).

O nível de deformação do solo está também relacionado positivamente ao número de passadas de máquina (Botta et al., 2004). Este fator afeta tanto a compactação superficial quanto a subsuperficial, pois o volume de solo compactado, tanto em profundidade quanto lateralmente à linha

de tráfego, aumenta à medida que as passadas se repetem (Novak et al., 1992). Os resultados obtidos por Novak et al. (1992) confirmam que, em condições de alta umidade do solo e maior peso sobre os rodados, o efeito do tráfego de rodados faz com que as tensões produzidas cheguem a uma maior profundidade.

Os efeitos da compactação do solo sobre as suas propriedades físicas têm sido claramente demonstrados, e resultam do impacto negativo deste processo sobre os diferentes níveis hierárquicos que compõe a estrutura do solo (Dexter, 1988). Dias Junior & Pierce (1996) relatam que a compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica, e diminui a porosidade total em função da redução no volume de macroporos, enquanto o de microporos permanece praticamente inalterado. Os mesmos autores mostram ainda que a compactação do solo ocasiona a diminuição da capacidade de infiltração de água e da condutividade hidráulica do solo, bem como o aumento do escoamento superficial e das taxas de perda de água e solo. Reduções significativas na produtividade de diversas culturas, em razão da compactação, têm sido relatadas com freqüência na literatura (Lipiec et al., 1991; Secco, 2003; Beulter & Centurion, 2004).

Os efeitos negativos da compactação sobre o desenvolvimento e produtividade das culturas parecem estar relacionados principalmente às condições de aeração e à resistência mecânica junto ao ambiente radicular. Alguns trabalhos de pesquisa (Tormena, 1998; Imhoff, 2002; Silva, 2003) têm evidenciado que, à medida que o grau de compactação aumenta, a porosidade de aeração considerada crítica (10%) diminui. Assim, em solos compactados, observa-se um incremento na probabilidade de ocorrência de umidades restritivas ao crescimento das plantas. Dessa forma, os efeitos da compactação sobre a produtividade das culturas tendem a ser mais pronunciados sob condições de excesso ou déficit hídrico (Unger & Kaspar, 1994). Tanto a deficiência de oxigênio (Hillel, 1982) quanto a elevada resistência mecânica à penetração (Rosolem et al., 2002; Foloni et al., 2003; Beulter; Centurion, 2004), diminuem o crescimento e a efetividade das raízes, afetando negativamente a absorção de nutrientes e água, por reduzir o volume de solo explorado pelo sistema radicular. Portanto, o efeito da compactação é mais prejudicial quanto mais próxima da superfície ela se localizar (Unger & Kaspar, 1994).

A compactação afeta também a disponibilidade de água às plantas. De maneira geral, solos compactados se caracterizam por uma baixa capacidade de infiltração de água e condutividade hidráulica (Dexter, 1991; Dias Junior & Pierce, 1996; Raper, 2005). Além disso, a compactação modifica a distribuição dos poros segundo o seu diâmetro, diminuindo a proporção de macroporos (Dias Junior; Pierce, 1996; Secco et al., 2004), o que, considerando uma mesma umidade, aumenta a energia com a qual a água é retida (Reichardt & Timm, 2004). Dessa forma, conforme os mesmos autores, a compactação pode dificultar o movimento de água do solo até a planta, haja vista que a intensidade deste processo é dada pelo produto do gradiente de potencial hídrico com a condutividade hidráulica.

A associação desses fatores certamente tem sido a causa da elevada concentração de raízes na camada superficial do solo, onde o estresse hídrico se manifesta, não apenas pela distribuição irregular da chuva, mas também pela baixa permeabilidade da camada subsuperficial do solo que limita o aprofundamento de raízes e a ascensão de água do subsolo às raízes das plantas dispostas superficialmente. Outro aspecto resultante dessa degradação física da camada subsuperficial do solo é o aumento da freqüência com que se observa, em lavouras manejadas sob SPD, a ocorrência de erosão hídrica, causada por chuvas intensas (Denardin et al., 2005).

Esse nível de degradação compromete o desenvolvimento e a produtividade de culturas implantadas sob SPD (Hamilton-Manns et al., 2002); e está associado a incipiente adoção de rotação de culturas (Denardin et al., 2008a); ao desregrado manejo da integração lavoura-pecuária (Lanzanova, 2005; Nicoloso, 2005); ao inadequado aporte de fitomassa ao solo, em quantidade, qualidade e freqüência; comprometendo a cobertura de solo (Agroconsult, 2008; 2010); ao recorrente uso de semeadoras equipadas, exclusivamente, com discos, como elementos rompedores de solo, que prejudicam o desenvolvimento das culturas principalmente em anos com deficiência hídrica (Mello et al., 2002); à ausência de práticas para manejo de enxurrada, como semeadura em contorno e terraceamento ou técnica equivalente; e ao inadequado uso de corretivos e fertilizantes químicos e orgânicos, aportados muitas vezes à lanço na superfície do solo (Denardin et al., 2008a).

As razões para o desencadeamento desses processos de degradação do solo estão associadas ao fato de que à adoção do SPD, como uma real ferramenta da agricultura conservacionista, ainda é realizada de maneira incorreta. É indiscutível que o processo de implementação plena do sistema, que demanda múltiplas tecnologias de produtos e de processos veiculados por serviços de assistência técnica, permanentemente, capacitada, atualizada e consciente da amplitude conceitual de agricultura conservacionista, ainda necessita ser consolidada. Por outro lado, questiona-se também a possível relação entre essa degradação do solo e a dinâmica, em longo prazo, da recorrência de certos processos recomendados para a implementação do SPD.

Nesse sentido, a comunidade científica tem levantado algumas hipóteses, que foram assumidas como premissas deste trabalho, em relação à utilização do sistema plantio direto: a calagem do solo, bem como o uso de fertilizantes orgânicos, sem incorporação, estariam promovendo dispersão de argila na camada superficial do solo e, conseqüentemente, sua eluviação para a camada subsuperficial, resultando em um processo de adensamento do solo; a fertilização recorrente do solo, exclusivamente em superfície, estaria contribuindo para a concentração de raízes na camada superficial do solo e, conseqüentemente, estratificando o perfil de solo em termos de atributos químicos e físicos de solo; mobilizações de solo, ocasionalmente praticadas com hastes sulcadoras atuando em maiores profundidades, poderiam promover melhoria efetiva da camada subsuperficial adensada e/ou compactada; a camada subsuperficial adensada e/ou compactada que restringe o aprofundamento de raízes, estaria limitando os fluxos ascendentes e descendentes de água no perfil do solo; o aporte de material orgânico por plantas cultivadas, proporcionado pela rotação de culturas, ou plantas espontâneas, estaria promovendo balanço positivo de carbono, suficiente para estruturar a camada subsuperficial do solo; o uso exclusivo de discos nas semeadoras, como elementos rompedores de solo, estaria condicionando o desenvolvimento radicular das plantas na camada superficial do solo.

O conceito de SPD, seja no âmbito da pesquisa, do ensino e da extensão, é, ainda, predominantemente, reducionista. Ações orientadas à transferência de conhecimentos e de tecnologias relativas à agricultura

conservacionista e a base conceitual holística de SPD necessitam ser retomadas, fortalecidas e subsidiadas por estudos voltados à mitigação das restrições denotadas na camada subsuperficial de solos sob SPD, as quais vêm promovendo efeitos indesejados à produtividade das culturas.

3 CAPÍTULO II. EVOLUÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM UM SISTEMA DE TRANSIÇÃO DO USO DO SOLO DE CAMPO NATURAL PARA ÁREA PRODUTORA DE GRÃOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

3.1 Introdução

Atualmente, há uma crescente preocupação social pela sustentabilidade agrícola, visando sistemas de produção que garantam a manutenção dos recursos naturais. Para que o solo possa promover a sustentabilidade dos sistemas de produção e desempenhar adequadamente suas funções de atuar como filtro ambiental, participar e regular o fluxo de massa e energia no ambiente e servir como meio para o crescimento de plantas (Reichert et al., 2003), se torna imperativo que este apresente qualidade ambiental. Esta qualidade pode ser alcançada por meio da integração de adequadas práticas de manejo de solo, transcorrido determinado período de tempo (Anghinoni, 2007; Sequinatto, 2010).

Muitas ações e projetos governamentais foram desenvolvidos nas últimas décadas, pelos órgãos de pesquisa e extensão rural, no intuito de aumentar a conservação e a capacidade produtiva dos solos (Mielniczuk, 1999), incluindo a implementação de novos sistemas de preparo do solo, como o sistema plantio direto (SPD), e sistemas de manejo das espécies vegetais implantadas, como os sistemas de rotação e sucessão de culturas (Salviano et al., 1998). Além disso, práticas como o uso de sistemas de manejo de culturas que incluam espécies vegetais com elevado e contínuo aporte de fitomassa ao

solo ainda continuam sendo amplamente difundidas e preconizadas por órgãos de pesquisa para melhorar a estrutura do ambiente solo, aumentar a atividade biológica e promover a ciclagem de nutrientes (Mielniczuk et al., 2000).

Para que haja melhoria da qualidade ambiental do solo, alguns autores (Denardin et al., 2001; Kluthcouski et al., 2004; Fonseca et al., 2007) citam que os sistemas de cultivo devem apresentar material orgânico aportado ao solo com frequência, quantidade, qualidade e ter boa distribuição de fitomassa radicular. Em adição, há a necessidade de se adotar sistemas de manejo de culturas que apresentem seqüência de diferentes culturas, não seguindo um padrão de alternância de espécies, mas de uma escolha de culturas apropriadas, considerando suas exigências edafoclimáticas e seus efeitos benéficos para o solo (Calegari et al., 1993; Dorneles, 2011).

O SPD promove uma série de benefícios pela formação de maior cobertura vegetal morta sobre a superfície do solo. Isso se deve principalmente em virtude da menor perturbação do solo, favorecendo a formação de agregados, reduzindo as perdas de solo por erosão hídrica, diminuindo a amplitude térmica do solo (Bayer et al., 2006). Além disso, ocorre redução das perdas de nutrientes (Bissani et al., 2008), melhorando a eficiência na reciclagem de nutrientes e diminuindo a lixiviação destes, acumulando nitrogênio (N) no sistema, diminuindo a demanda de fertilizantes minerais nitrogenados (Aita, 1997). De forma similar, as taxas de perda de matéria orgânica são reduzidas (Bayer et al., 2006), aumentando o teor de matéria orgânica do solo de forma mais efetiva na sua superfície (Oades, 1993; Lovato, 2001; Lopes et al., 2004), e contribuindo para a manutenção ou elevação do potencial produtivo das culturas (Santos & Tomm, 1999; Dornelles, 2011).

Igualmente, a fertilidade do solo é afetada pelos diferentes métodos de preparo do solo, associados a sistemas de culturas e da adubação (Dornelles, 2011). Os resíduos das culturas contêm quantidades expressivas de nutrientes (Gassen & Gassen, 1996) que podem ser incorporados ao solo pela ação da chuva, caracterizando a reciclagem de nutrientes, uma vez que as plantas retiram os nutrientes de camadas subsuperficiais e os depositam em camadas superiores (Fiorin, 1999; Ambrosano et al., 2005) ou, mediante sua mineralização podem depositá-los na superfície do solo e disponibilizá-los às culturas (Wisniewski & Holtz, 1997; Borkert et al., 1999). Como no SPD não há

acentuada incorporação dos resíduos, os nutrientes são liberados na superfície do solo, promovendo um gradiente químico de nutrientes no perfil (Costa, 2008), em função de seu acúmulo na camada superficial. Em contrapartida, quando há mobilização mais intensa do solo, ocorre uma distribuição mais uniforme dos nutrientes na camada arável (Sidiras & Pavan, 1985).

O aumento gradual no teor de matéria orgânica (MOS) do solo sob SPD, principalmente, na camada superficial, influencia os atributos físicos, biológicos e químicos do solo, uma vez que várias funções e processos ligados a capacidade produtiva dos solos, como a infiltração e retenção de água, estabilidade de agregados e estrutura, atividade microbiana, resistência à erosão, disponibilidade de nutrientes para os vegetais, diminuição dos efeitos deletérios às plantas pela toxidez causada por alguns elementos às plantas e capacidade de troca de cátions (CTC) estão diretamente relacionados à presença da matéria orgânica (Seybold et al, 1998; Shukla et al., 2006; Bayer & Mielniczuk, 2008).

As alterações no uso da terra têm, portanto, estreita relação com a dinâmica da matéria orgânica (Stürmer et al., 2011) e com o ciclo biogeoquímico dos elementos, modificando a capacidade produtiva desses ambientes (Brown et al., 1994).

Mesmo com a utilização do SPD há vários anos em muitas lavouras, com a promoção de uma acentuada melhoria ambiental do solo, com frequência ainda se observam problemas na estabilidade da produção agrícola e frustrações de safra, motivados por déficit hídrico, mesmo quando ocorrem pequenos períodos sem chuva (Fontana & Berlato, 1997; Denardin et al., 2008), o que pode estar associado à estratificação química do perfil do solo que promove favoráveis condições físicas para o desenvolvimento de raízes na camada superficial do solo (Costa, 2008).

Neste cenário, as hipóteses deste estudo para um Argissolo localizado na Depressão central do RS, sob SPD há 10 anos foram: I) a fertilização do solo uma vez ao ano, principalmente com fertilizantes orgânicos e, exclusivamente em superfície, contribui para a concentração de nutrientes na camada superficial do solo e, conseqüentemente, estratifica o perfil de solo em termos de atributos químicos; II) o aporte de material vegetal de diferentes espécies proporcionado pela rotação/sucessão de culturas, e o aporte de

material orgânico proveniente da fertilização com adubos orgânicos promovem aumento do teor e estoque de carbono, suficiente para promover boas condições químicas na camada subsuperficial do solo; III) o aporte insuficiente de material vegetal por sistemas que usam o pousio na estação invernal, não agregam suficiente condição para melhoria da qualidade química do solo, quando comparado com condições de manutenção do campo natural ou condução de culturas cultivadas na estação hiberna.

No intuito de verificar as hipóteses propostas, o objetivo principal deste trabalho foi estudar o efeito do manejo das culturas de cobertura no inverno e da adubação nos atributos químicos de um Argissolo Vermelho num experimento de longa duração onde ocorreu a conversão de campo natural para área produtora de grãos sob o SPD.

3.2 Material e Métodos

O estudo aqui apresentado relaciona a evolução de atributos químicos de um Argissolo em um sistema de transição de uso, num período de dez anos (2000-2010), de campo natural para área produtora de grãos sob sistema plantio direto em experimento de campo instalado na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS). Esse experimento é parte integrante de um projeto mais abrangente, intitulado “Produtividade e sustentabilidade de sistemas de produção agrícola a partir de campo natural na região da Depressão Central - RS”, que tem como intuito realizar estudos de longa duração em relação aos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, além de aspectos econômicos e energéticos, envolvendo sistemas de produção, procurando-se simular todas as atividades e condições de lavouras comerciais.

3.2.1 Localização e histórico da área experimental

O presente estudo foi conduzido em experimento instalado desde o ano de 2000, na EEA-UFRGS (Figura 1), localizada no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central, caracterizada por solos rasos a pouco profundos, com baixa fertilidade natural, de textura franco-argilo-

siltosa e relevo com declividade média a moderada (Espírito Santo, 1988). O local se caracteriza por apresentar relevo formado por planícies aluviais amplas e pendentes sedimentares e apresenta declividade entre $0,01$ a $0,03 \text{ m m}^{-1}$.

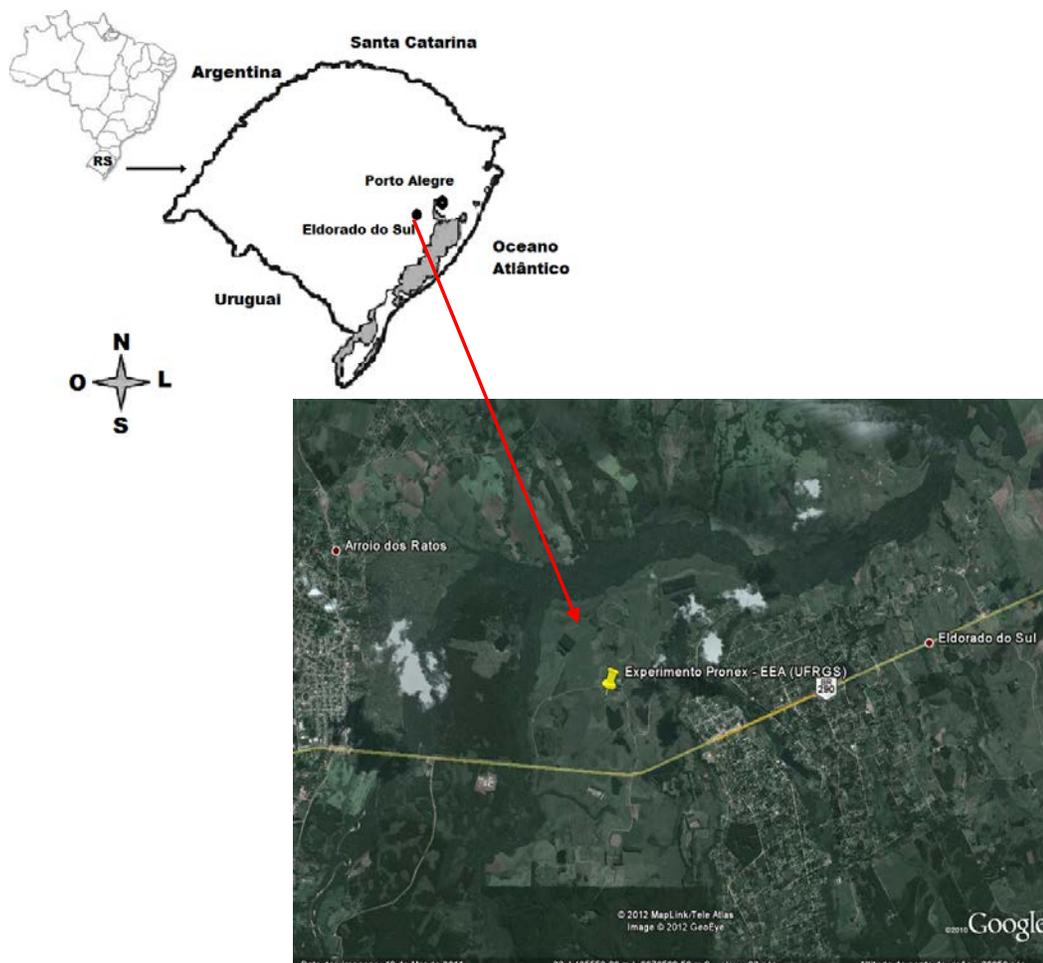


Figura 1. Localização da área experimental na EEA-UFRGS, Eldorado do Sul-RS, Brasil. Fonte: Google Earth®.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa, 2006a) pertencente a Unidade de Mapeamento São Jerônimo (Brasil, 1973), conforme descrição apresentada no Apêndice 1.

O clima, segundo classificação de Köppen, é subtropical de verão úmido quente – Cfa, com a temperatura do mês mais frio oscilando entre -3 e $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e do mês mais quente superior a $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A precipitação média anual é de 1.440 mm , com média mensal de 120 mm . Mesmo assim, a área está sujeita a estiagens freqüentes no período de verão (Bergamaschi & Guadagnin, 1990). Essas características determinam um ecossistema naturalmente frágil e potencialmente sujeito à degradação quando não são observados o correto uso

e aptidão do solo.

A área experimental estudada consistia, até o ano 2000, de campo natural e estava sob pastagem natural por um período de aproximadamente 15 anos, sem histórico de cultivos anteriores. A soja foi a primeira cultura a ser estabelecida na área no sistema de plantio direto, mediante dessecação da cobertura natural e sem revolvimento algum do solo, no ano de 2000.

3.2.2 Tratamentos

Da área inicialmente organizada para atender aos objetivos do projeto original, este estudo ocupou seis glebas (I, II, III, IV, VII e VIII) com dimensões de 15 x 30 m, perfazendo uma área de 450 m² para cada gleba, onde cinco destas receberam os tratamentos de sistemas de culturas e de adubação sob SPD (I, II, III, IV, e VIII), enquanto que a outra (VII) foi mantida sob campo natural (Figura 2).

As parcelas foram dimensionadas de forma que os tratamentos culturais fossem mecanizados com a implantação de culturas de grãos sendo realizada diretamente sobre a pastagem natural no início do experimento, buscando-se repetir as condições de lavoura. Entre as parcelas foi mantida uma faixa com 20 m de largura funcionando como corredor para a realização de manobras dos implementos e máquinas agrícolas.

Os tratamentos deste estudo (Tabela 1) estão dispostos em glebas de acordo com o manejo das culturas hibernais de cobertura do solo e da adubação, consistindo de quatro sistemas de culturas: a) rotação: culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e tráfego de rodados de colhedora; b) sucessão: culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e ausência de tráfego da colhedora; c) pousio: sem cultivo de inverno, permitindo a ocorrência de plantas espontâneas após a colheita das culturas de verão; d) pastagem natural, sem adubação.

Nos tratamentos com adubação orgânica, foi aplicada cama de aviário, em doses (Apêndice 2) conforme sua composição química (Apêndice 3) e exigências das culturas.

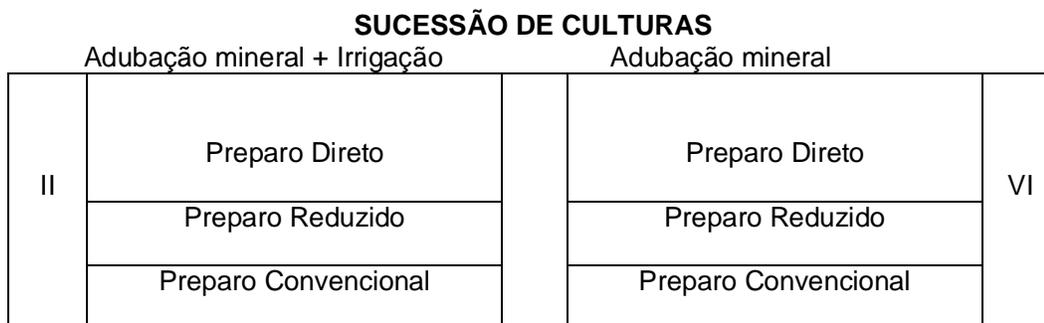
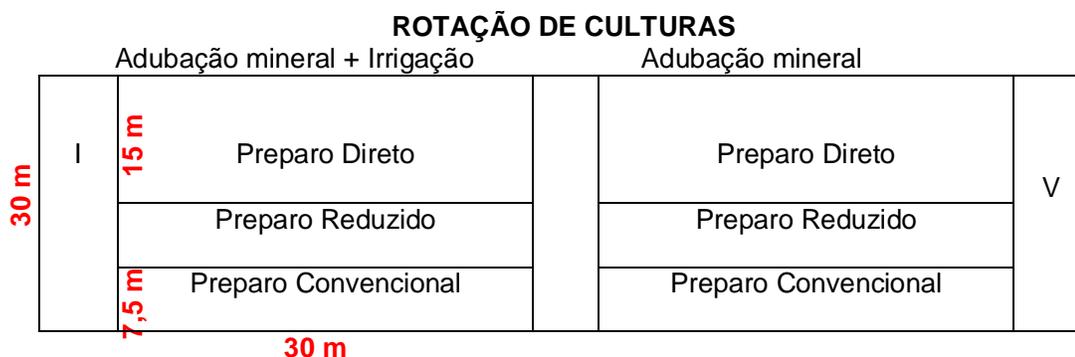
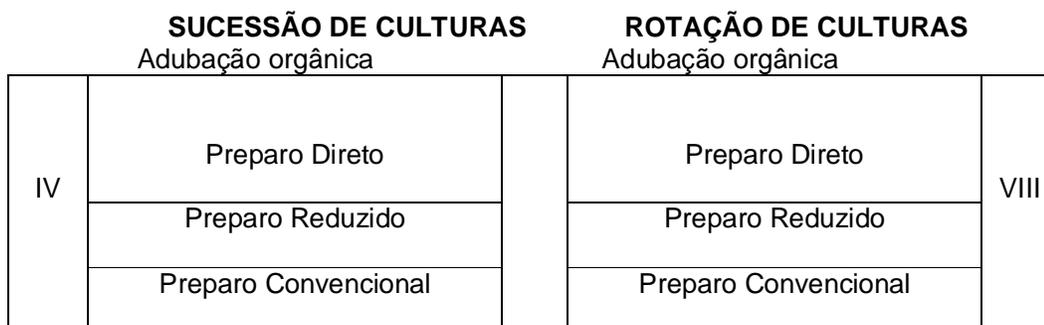
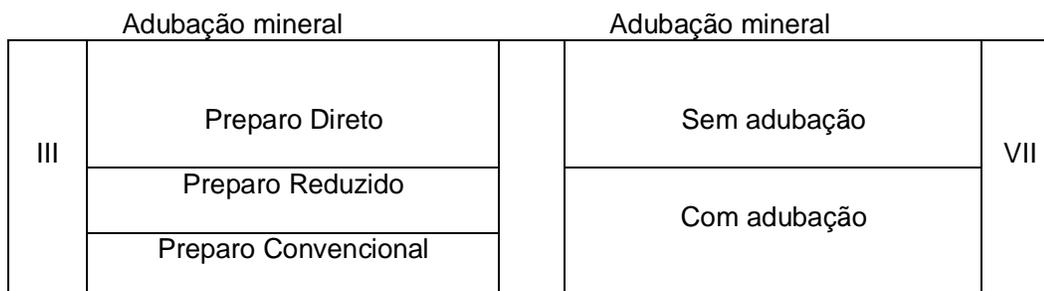
**POUSIO INVERNO – CULTURA VERÃO****CAMPO NATIVO**

Figura 2. Croqui da área do estudo original. EEA-UFRGS, Eldorado do Sul-RS, Brasil.

Um dos tratamentos sob fertilização mineral, gleba I (PD 1), foi manejado com rotação de culturas, que constou do cultivo de espécies para produção de grãos, como o trigo (*Triticum aestivum*), aveia branca (*Avena*

sativa) e aveia preta (*Avena strigosa*), formando-se a seguinte seqüência de culturas: soja–trigo/aveia branca/aveia preta–milho. Em outro tratamento, gleba II, denominado PD2, no período de inverno, na maioria dos anos, a sucessão de culturas constou do cultivo consorciado de aveia preta (*Avena strigosa*) + ervilhaca (*Vicia sativa*), como espécies de cobertura do solo, com razoável ocorrência de azevém (*Lolium multiflorum*), por estabelecimento espontâneo, estabelecendo-se assim a seqüência cultural soja–aveia/ervilhaca/azevém–milho. Um terceiro tratamento, gleba III, foi mantido sob pousio no inverno, estabelecendo-se a seguinte seqüência de culturas, soja–pousio–milho (PD3). As espécies que predominavam na área eram o azevém, a nabiça e outras espécies daninhas espontâneas de menor representatividade. Tradicionalmente a área de pousio apresenta elevado estabelecimento de espécies e produção de fitomassa. Os dois tratamentos restantes, nas glebas IV e VIII, onde se aplicou adubação orgânica, diferenciam-se pela sucessão de culturas (PD4) em um, e rotação (PD5) no outro. A gleba VII, mantida com pastagem natural não foi adubada e foi mantida como testemunha (CN) da condição original da área.

Tabela 1. Distribuição dos tratamentos de sistemas de culturas e adubação e irrigação nas parcelas experimentais

Tratamento	Sistema de cultura	Adubação
PD 1	Rotação	Mineral
PD 2	Sucessão	Mineral
PD 3	Pousio	Mineral ⁽¹⁾
PD 4	Sucessão	Orgânica
PD 5	Rotação	Orgânica
CN	Pastagem natural	Sem adubação

⁽¹⁾ Adubação realizada apenas para os cultivos de verão.

A implantação e condução das culturas obedeceram às recomendações técnicas para cada cultura ou grupo de culturas. No período de máximo desenvolvimento vegetativo as culturas de cobertura no sistema em sucessão foram dessecadas com o uso de herbicidas. Para os tratamentos com rotação, as culturas de cobertura foram colhidas com colhedora automotriz, equipada com picador de palha, procurando-se obter uma

homogênea distribuição dos resíduos.

A fertilização da área experimental quanto a doses, formas e épocas de aplicação teve por base as recomendações disponíveis em CQFS-NRS (1995; 2004). Em 2000, após a dessecação da vegetação natural e anteriormente ao preparo do solo, foi aplicado à lanço, calcário dolomítico nas glebas com adubação mineral. A quantidade de equivalente CaCO_3 aplicada no período de 2000-2010 consta no Apêndice 2. Até o momento foi realizada uma única aplicação de calcário, pois os índices analíticos indicadores da acidez ainda encontram-se em níveis satisfatórios.

Outras informações referentes ao histórico da área e tratamentos implantados podem ser obtidas em (Bizarro, 2004; 2008; Lisboa, 2009; Boukounga, 2010; Dorneles, 2011), que desenvolveram trabalhos no mesmo local.

3.2.3. Análises químicas

No início do experimento (primavera-verão de 2000), a área foi caracterizada quimicamente (Tabela 2, Apêndices 4, 5, 6 e 7), por coleta de amostras de solo em “grid” de 10 x 10 m. Para a coleta de amostras após 10 anos sob SPD, sempre que possível foi observado o posicionamento das linhas de semeadura, em ambos os sistemas de adubação. Em geral, foram escolhidos ao acaso, nas linhas de semeadura, cinco pontos de coleta. Em cada ponto, foi feita uma tradagem na linha de plantas da cultura anterior adubada e, ao lado desta, perpendicularmente à linha, tradagens a cada 0,05 m, até o centro de cada entrelinha, tendo-se então um número variável de tradagens em função do espaçamento da cultura. O solo coletado em cada tradagem formou uma amostra composta.

A coleta das amostras destinadas à análise química do solo após 10 anos de condução do experimento (Apêndices 8, 9 e 10) foi realizada nas camadas de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m. Em cada tratamento e camada, foi coletada uma amostra composta para análise. A coleta estratificada de amostras foi executada com a abertura de uma trincheira, utilizando-se uma pá, régua e faca. Para estas determinações, as amostras foram coletadas ao final do ciclo das culturas de verão, período considerado de

maior estabilidade bioquímica no solo.

Tabela 2. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento*. Eldorado do Sul-RS, 2000.

Camada (m)	pH	P	K	CTC ¹	H+Al	Ca	Mg	S
		---mg dm ⁻³ ---		-----cmol _c dm ⁻³ -----				%
0,0 - 0,05	5,2	3,7	213	8,7	3,9	2,8	1,4	54
0,05 - 0,10	5,2	3,1	151	8,1	4,1	2,5	1,1	49
0,10 - 0,15	5,2	2,0	121	7,9	3,8	2,6	1,2	51
0,15 - 0,20	5,2	1,8	106	8,1	4,2	2,4	1,2	48

* Valores médios da área total do experimento

¹ Capacidade de troca de cátions

3.2.3.1 Teor de nutrientes, CTC e acidez

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas (peneira com malha de 2 mm) obtendo-se a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). As análises químicas foram executadas no Laboratório de Análises de Solo e Água, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia/UFRGS. Foram determinados os teores de P, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ e Al⁺⁺⁺; a acidez ativa (pH em água) e potencial (H⁺+Al⁺⁺⁺); a capacidade de troca de cátions (CTC); e a saturação por bases e por alumínio. O pH do solo foi determinado por potenciômetro na suspensão solo-água, na proporção de 1:1 (10 cm³ de solo e 10 mL de água destilada), após 30 min. Os teores de cálcio (Ca⁺⁺) e magnésio (Mg⁺⁺) foram determinados por espectroscopia de absorção atômica após extração com KCl 1,0 mol L⁻¹. O potássio (K⁺) trocável foi extraído com uso do extrator de Mehlich-1 e determinado por fotometria de chama. O fósforo (P) foi extraído com a solução de Mehlich-1 e determinado por colorimetria. A acidez potencial (H⁺ + Al⁺⁺⁺) foi estimada indiretamente a partir do índice SMP, com uso da equação $H + Al = e^{(10,665-1,1483SMP)}/10$, proposta por Kaminski et al. (2001) e em uso pela CQFS-NRS (2004). O Al⁺⁺⁺ trocável extraído com solução de KCl 1,0 mol L⁻¹ e titulado com NaOH 0,025 mol L⁻¹. Essa análise seguiu a metodologia preconizada por Embrapa (1997). A partir dos dados analíticos foram calculadas a capacidade de troca de cátions efetiva (Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ + K⁺ + Al⁺⁺⁺), CTC a pH 7,0 (Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ + K⁺ + H⁺ + Al⁺⁺⁺),

a saturação por alumínio ($Al.100/S+Al^{+++}$) e a saturação por bases ($S.100/CTCpH7$), sendo S a soma de bases ($Ca^{++} + Mg^{++} + K^{+} + Na^{+}$).

3.2.3.2 Teor e estoque de carbono orgânico total do solo

A coleta das amostras destinadas à análise dos teores de carbono foi realizada nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, com 3 repetições para cada tratamento. O teor de carbono orgânico foi determinado em amostras secas ao ar moídas a 0,15 mm em gral de ágatha. A análise química do teor de carbono orgânico foi realizada no Laboratório de Manejo do Solo do Departamento de Solos da UFRGS, empregando-se o método da combustão seca em equipamento Shimadzu TOC (modelo V_{CSH}). Os estoques de carbono ($Mg\ ha^{-1}$) nas camadas avaliadas em cada tratamento foram calculados utilizando a equação:

$$EstC = (CO \times Ds \times e)/10,$$

em que *EstC* é o estoque de C orgânico para cada camada avaliada ($Mg\ ha^{-1}$); *CO* é o teor de C orgânico total ($g\ kg^{-1}$); *Ds* é a densidade do solo média de cada camada ($Mg\ m^{-3}$), determinada a partir de amostras indeformadas (capítulo III) e, *e* é a espessura da camada considerada (cm).

3.2.4 Análise estatística

Para a análise estatística dos dados dos teores e estoque de carbono orgânico das distintas frações de carbono nas camadas de solo avaliadas, realizou-se a análise de variância (ANOVA) segundo o delineamento experimental inteiramente casualizado, mediante o emprego de fator único (6 manejos das culturas hibernais de cobertura) com três repetições para cada camada de solo estudada. Quando a ANOVA indicou a ocorrência de diferenças significativas (teste F, $p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas entre si, através do teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro. Além disso, as médias de cada camada do solo, tomando como repetição

os valores da variável em cada tratamento (6) e, as médias de cada tratamento, utilizando-se como repetição as 4 camadas de solo, foram comparadas entre si pelo mesmo teste. A ANOVA e os testes de comparação entre médias pelo teste Tukey, foram realizados com o auxílio do programa computacional SAS (SAS Institute, 2002). Para as demais análises químicas do solo, não foi realizada análise estatística, uma vez que a amostra avaliada se constituía de amostra composta, não havendo repetições. Os dados destas análises apenas são apresentados, avaliados de acordo com os parâmetros descritos em CQFS-NRS (2004), mas sem compará-los estatisticamente.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Teor de nutrientes, CTC e acidez

Os distintos manejos das plantas de cobertura e da adubação mostraram efeito sobre os valores de pH do solo (Figura 3). O pH do solo em área mantida com a vegetação natural evidenciou valores próximos a 5,0 na maior parte do perfil do solo avaliado, sem apresentar substancial oscilação dos valores ao longo perfil do solo, permanecendo abaixo do nível crítico (5,5) para este atributo. Para os demais tratamentos, onde houve conversão de campo natural para área produtora de grãos sob sistema plantio direto, mormente na camada de 0-0,10 m, observou-se, um aumento nos valores de pH em relação à área onde não houve mudanças no uso da terra. Nos primeiros 0,10 m do perfil do solo somente a área sob campo natural permaneceu com valores de pH inferiores a 5,5. Transcorridos 10 anos de aplicação de cama de aviário nos tratamentos sob adubação orgânica, no entanto, os valores de pH para os tratamentos conduzidos sob o sistema plantio direto são semelhantes.

Mesmo assim, para esta mesma camada, nos tratamentos com aplicação de adubação mineral os valores de pH foram maiores que para os tratamentos com adubação orgânica. Dorneles (2011) cita que isto decorre do fato de que o calcário aplicado nos tratamentos com adubação química foi mais efetivo na alteração do pH quando comparado com a cama de aviário aplicada nos tratamentos com adubação orgânica.

Embora não sejam propriamente utilizados como corretivos da acidez do solo e sim como fertilizantes, vários autores (Silva et al., 2002; Scherer et al., 2007; Pires et al., 2008) reportam um aumento do pH do solo com a utilização de esterco. De acordo com Tisdale & Nelson (1966) a ocorrência da elevação do pH do solo adubado com compostos orgânicos pode ser atribuída à formação de radical amina, $R-NH_2$, processo conhecido como aminação. A acumulação de ânions orgânicos eleva o consumo de prótons em resposta à absorção de amônio, ou prótons produzidos durante o processo de nitrificação (Theodoro et al., 2003). Em adição, o elevado pH dos fertilizantes orgânicos (Apêndice 3) pode ter contribuído para o aumento deste atributo no solo, principalmente em superfície.

Quando confrontados os dados de pH do solo em sistemas de rotação com os sistemas de sucessão de culturas percebe-se que para todas as profundidades, os sistemas com rotação de culturas (PD1 e PD5) apresentaram valores de pH superiores aos encontrados para os sistemas de sucessão, que apresentam leguminosas em sua composição botânica. Embora Miyazawa et al. (1993) citem que os efeitos dos resíduos vegetais dependam das características e composição do material vegetal utilizado e que os resíduos de leguminosas, geralmente, têm efeito mais pronunciado do que os de gramíneas na correção de pH, os dados obtidos são controversos em relação a este assunto. Provavelmente a quantidade de material adicionado tenha sido mais importante que o tipo de material vegetal aportado ao solo. Outra provável causa para valores de pH inferiores nos sistemas com leguminosas reside no fato de que oxidação biológica dos compostos orgânicos ao liberar além do N, também o S que ao sofrer oxidação, pode liberar prótons (H^+) na solução do solo após a mineralização do material orgânico oriundo do adubo orgânico adicionado ao solo (Sousa et al., 2007).

Para as camadas mais profundas de solo (0,10-0,15 e 0,15-0,20 m) se observou uma clara distinção entre os tratamentos com adubação química e orgânica. Devido à pequena mobilização do solo em SPD, há uma tendência de manutenção dos efeitos da adubação orgânica somente em superfície. Nos tratamentos com adubação química, o efeito do calcário pode ser observado em camadas mais profundas. Alguns autores sugerem que esse efeito da calagem em profundidade pode ocorrer em função do deslocamento das

partículas finas de calcário, por canais formados por raízes mortas ou por organismos do solo (Oliveira & Pavan, 1996; Rheinheimer et al., 2000), ou pela formação de complexos entre as substâncias orgânicas hidrossolúveis e o Ca e o Mg na superfície do solo e posterior troca desses cátions pelo alumínio em camadas mais profundas (Miyazawa et al., 1992). Além disso, a utilização das hastes sulcadoras como elementos rompedores do solo podem ter promovido a incorporação de calcário ao longo dos sulcos de semeadura uma vez que os sulcos não foram produzidos sempre nos mesmos locais, visto a ausência de tráfego controlado na área, dando maior estabilidade dos efeitos corretivos em profundidade.

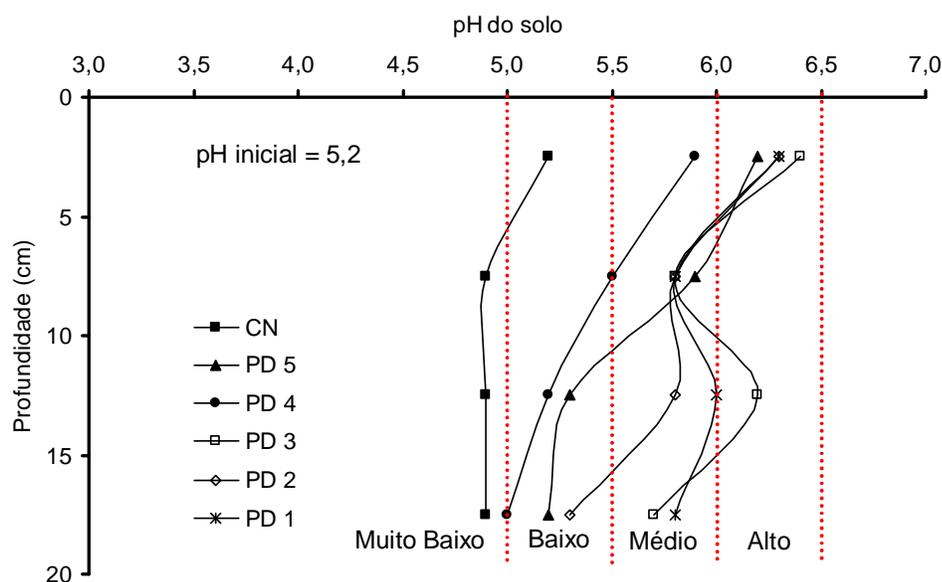


Figura 3. pH do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo. As barras verticais vermelhas são linhas indicativas dos valores de referência, segundo os critérios de CQFS-NRS (2004).

Da mesma forma que para o pH do solo, a acidez potencial foi influenciada pelos distintos manejos das culturas de cobertura e da adubação. Com a conversão da área mantida sob vegetação natural para área sob SPD ocorre um decréscimo da acidez potencial do solo (Figura 4). A acidez

potencial do solo mantido sob vegetação natural não apresentou elevada oscilação vertical dos valores ao longo do perfil, permanecendo, em todas as camadas com valores próximos a $4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Nos tratamentos onde houve conversão de área com campo natural para área produtora de grãos sob SPD, observou-se uma diminuição da acidez potencial principalmente na camada superficial de solo (0-0,10 m). Pires et al. (2008) citam que esse efeito se deve ao aumento do pH do solo. Da mesma forma, Nicolodi et al. (2008) reforçam essa afirmação e salientam a importância do teor de matéria orgânica presente nos solos para a determinação da relação entre pH e acidez potencial. Solos com menor teor de matéria orgânica, provavelmente possuem maior teor de Al^{+3} em virtude da menor complexação desse elemento pela matéria orgânica (Ciotta et al., 2002).

Quando se realiza uma comparação entre os sistemas de manejo das culturas e da adubação, no entanto, de modo geral não se percebe evidente distinção dos valores de acidez potencial. Na camada superficial, de 0-0,10 m, mais uma vez, os valores da acidez potencial não se diferenciaram acentuadamente, mostrando um rigoroso comportamento oposto ao pH e reforçando as teorias supracitadas. Entretanto, em camadas mais profundas, como 0,10-0,15 m e 0,15-0,20 m, a origem dos fertilizantes aplicados interfere na acidez ativa. Nos tratamentos onde houve aplicação de fertilizantes minerais a acidez potencial foi menor comparativamente ao uso de fertilizantes orgânicos. Mais uma vez se percebe que a atuação dos compostos orgânicos se restringe a camadas mais próximas à superfície, enquanto que a aplicação de calcário apresentou efetividade maior em profundidade.

Em relação aos sistemas de culturas não se pôde estabelecer um paralelo entre estes com a acidez potencial. Enquanto que para algumas camadas os sistemas de rotação de culturas apresentaram maior eficiência na atenuação da acidez potencial, em outras camadas a maior efetividade foi apresentada pelos sistemas de sucessão de culturas. Para todos os sistemas de manejo das culturas e adubação, inclusive para as áreas mantidas sob vegetação natural, ocorreu um aumento da acidez potencial em profundidade. Provavelmente isso esteja também relacionado à diminuição do teor de matéria orgânica em camadas mais profundas (Tabela 3).

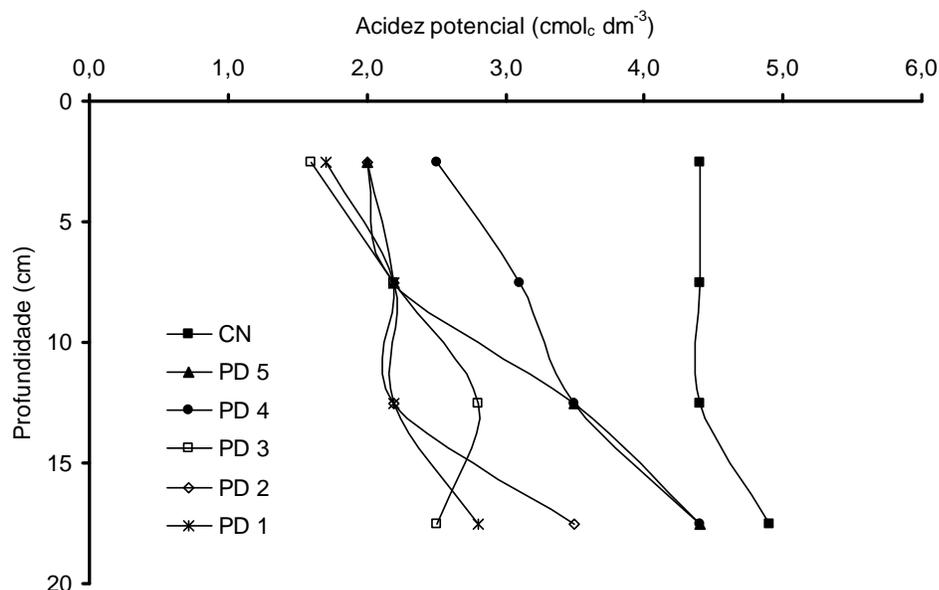


Figura 4. Acidez potencial do solo ($H+Al^{+3}$) sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

A estratificação química do perfil do solo em SPD é mais perceptível quando se observa os valores da capacidade de troca de cátions do solo (Figura 5). Da mesma forma que para os valores de pH e acidez potencial, solos que permanecem com vegetação natural apresentam uma maior homogeneidade no comportamento da capacidade de troca de cátions (CTC). Neste estudo, os valores de CTC para o CN permaneceram próximos a $8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo classificados de acordo com critérios estabelecidos pela CQFS-NRS (2004) como uma CTC média.

Para a CTC, a estratificação deste atributo no perfil do solo é evidenciada principalmente na camada de 0-0,05 m, onde esta passou de média para alta, com valores acima de $15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no sistema com aplicação de fertilizantes orgânicos e rotação de culturas. Além deste, todos os demais sistemas de culturas apresentam aumento da CTC na camada superficial em relação ao CN. Bayer et al. (2006) citam que para solos caulíníticos que apresentam minerais com baixa densidade de cargas negativas, a MO apresenta um papel fundamental na capacidade de retenção de cátions, uma

vez que a MOS é a principal fonte de cargas negativas nestes solos (Meurer et al., 2006). Nesses tipos de solos, a manutenção ou o aumento do teor de matéria orgânica contribui para a retenção dos nutrientes e a diminuição da lixiviação dos mesmos (Bayer & Mielniczuk, 2008).

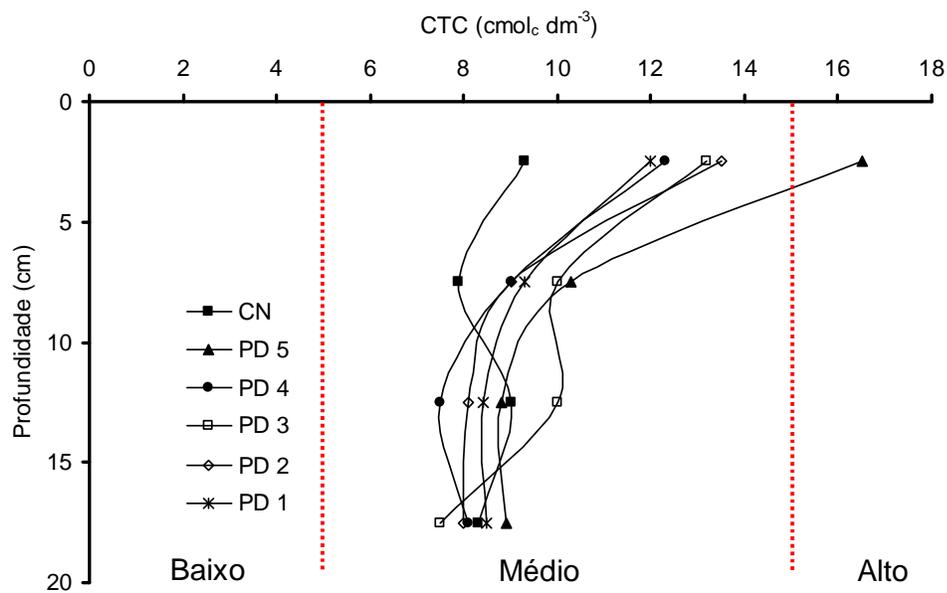


Figura 5. Capacidade de troca de cátions (CTC) sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo. As barras vermelhas verticais delimitam as classes de CTC citadas por CQFS-NRS (2004).

Em solos constituídos por maiores teores de areia, tendo, portanto, menor poder tampão, Bayer (1992) e Ciotta (2001) também verificaram incrementos significativos na CTC em SPD, notadamente nas camadas mais superficiais do perfil do solo.

Para as demais camadas de solo, 0,05-0,10 m, 0,10-0,15 m e 0,15-0,20 m, os valores da CTC foram classificados como médios, permanecendo entre 7 e 10 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Em camadas mais profundas do perfil de solo, os efeitos dos sistemas de manejo da adubação e das culturas de cobertura sobre este atributo químico são menores. Como em subsuperfície o predomínio de cargas negativas é dado pela quantidade de argila, e este atributo não

apresentou significativas alterações entre os sistemas de manejo e adubação (ver Cap. III), a CTC também não foi significativamente alterada. Similarmente, Centurion et al. (1985) sugerem que os métodos de preparo de solo sem revolvimento concentram os cátions trocáveis nas camadas mais superficiais e reduzem a concentração destes em camadas mais profundas.

Como os sistemas de culturas promoveram alterações no pH (Figura 3) e na CTC (Figura 5), a disponibilidade de bases trocáveis, como o potássio (K), também é afetada (Figura 6). Para todos os sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação o teor de potássio decresce com o aumento da profundidade no perfil do solo.

Embora na área mantida com vegetação natural o teor de potássio tenha decrescido com a profundidade no perfil, passando de valores próximos a 140 mg dm^{-3} na camada de 0-0,05 m, para teor próximo ao nível crítico (60 mg dm^{-3}), o decréscimo não foi tão acentuado como para os demais sistemas de manejo. Esses dados sustentam, mais uma vez, a ocorrência de estratificação química do perfil do solo em áreas cultivadas sob o SPD.

Na camada mais superficial do perfil do solo, de 0-0,05 m, para todos os sistemas de manejo o teor de potássio é considerado muito alto. No entanto, até mesmo nas camadas mais profundas, o teor de potássio apresenta valores superiores ao nível crítico estabelecido pelo CQFS-NRS (2004), que é de 60 mg dm^{-3} . Estes altos teores de K encontrados em todas as camadas de solo avaliadas se devem, segundo Dorneles (2011), em função do material que deu origem a este solo, granito, possuir alto teor natural deste elemento.

Nesta mesma camada, de 0-0,05 m, os distintos manejos das culturas ou da adubação do solo não evidenciaram diferenciação entre si. No entanto, quando estes teores são confrontados com os teores encontrados na área mantida sob vegetação natural, nota-se um significativo aumento. Anghinoni (2006) cita que aumentos da CTC e do pH do solo, promovidos principalmente pelo aumento do teor de matéria orgânica do solo, aumentam a capacidade do solo em reter K e modificam a distribuição do mesmo no perfil do solo, acumulando este nutriente em camadas mais superficiais.

Em adição, a concentração superficial do K em áreas cultivadas sob SPD pode ser provocado pela reciclagem de nutrientes no sistema solo-planta, onde as plantas absorvem os nutrientes de camadas mais profundas no perfil

do solo e os depositam em camadas mais superficiais. O potássio não faz parte de nenhuma estrutura ou molécula orgânica, sendo encontrado como cátion livre ou adsorvido, tornando-o facilmente trocável das células ou dos tecidos, e com alta mobilidade intracelular (Taiz & Zeiger, 1991). Assim, esse nutriente pode ser facilmente removido das plantas para o solo pela ação da chuva (Fiorin, 1999; Ambrosano et al., 2005).

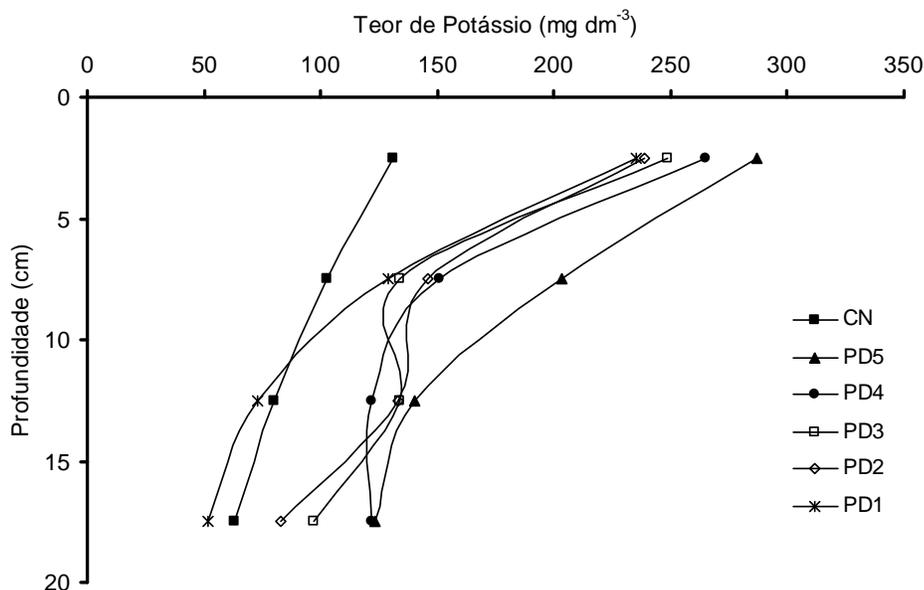


Figura 6. Teor de potássio (K) no solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Ainda, mediante a mineralização dos restos culturais pode ocorrer a deposição desse nutriente principalmente na superfície do solo (Wisniewski & Holtz, 1997; Borkert et al., 1999) em virtude da baixa mobilização do solo em SPD. A reciclagem de nutrientes, como fator de concentração de K em camadas superficiais, também é evidenciada e assume importante papel nas áreas adubadas com fertilizantes minerais. Mesmo que aplicação de K em muitos anos agrícolas tenha sido restrita em função dos dados da análise química do solo, no período de condução do experimento (Apêndice 2), houve um grande acúmulo de K na superfície.

Entretanto, em quase todas as camadas de solo, as áreas adubadas com fertilizantes orgânicos apresentaram teores absolutos de K superiores aos teores encontrados nas áreas adubadas com fertilizantes minerais. Esse comportamento pode ser explicado pela maior quantidade deste nutriente aplicado via fertilização orgânica em comparação com a fertilização química da área (Apêndice 2). Mesmo não havendo necessidade de adubação potássica no sistema orgânico, ocorre reposição de K como elemento acompanhante de N ou P que geralmente são os parâmetros para recomendação de fertilizantes em sistemas de adubação orgânica (CQFS-NRS, 2004).

Em camadas mais profundas do perfil do solo (0,05-0,10, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m), em todos os sistemas de manejo das culturas hibernais de cobertura ou da adubação, os teores de K, embora inferiores à camada superficial, são semelhantes ou superiores aos teores de K em áreas mantidas com vegetação natural. Evidencia-se assim, que o SPD melhora a condição química do solo também em profundidade, mesmo que com efeito inferior ao apresentado nas camadas superficiais. De modo geral, no SPD ocorre uma redistribuição desse nutriente no perfil do solo principalmente pela lixiviação de camadas superiores (Rosolem et al., 2006).

Assim como para a acidez potencial e para a CTC, os sistemas de manejo das culturas hibernais de cobertura não apresentaram efeito sobre o teor de potássio no solo. Provavelmente a pequena diferença na quantidade deste nutriente aplicado ao solo (Apêndice 2) pode explicar a ausência de efeito do manejo das culturas sobre o teor de K no solo. Outrossim, Torres & Pereira (2008) citam que o acúmulo de K nos tecidos vegetais depende da espécie vegetal utilizada no manejo do solo, sendo que as gramíneas apresentam maior acúmulo de K que as espécies leguminosas. No entanto, observaram também que o maior acúmulo de K ocorre onde há maior produção de matéria seca. Nesse sentido, a ausência de efeito dos sistemas de manejo das coberturas vegetais sobre o teor de potássio também pode estar associada à variação da produção de fitomassa das culturas nos distintos anos agrícolas (Cap. V).

Similarmente ao que ocorre para o K, o uso de práticas agrícolas conservacionistas como o SPD, independentemente dos sistemas de manejo das culturas hibernais de cobertura do solo ou da adubação, afetaram a

disponibilidade do fósforo (P) às plantas (Figura 7), melhorando a fertilidade natural do solo. A estratificação química do perfil, com alta concentração superficial e formação de gradiente químico com a profundidade foi notadamente verificada.

O P, por consequência de sua intensa fixação ao solo e baixa disponibilidade natural em muitos solos, é um dos elementos que mais restringe a produtividade das lavouras (Novais & Smyth, 1999). Por este motivo, é um dos nutrientes aplicados em maiores doses nas operações de fertilização das lavouras.

Em relação ao seu teor no solo, nas áreas mantidas sob vegetação nativa há uma pequena disponibilidade deste nutriente no solo, tanto em superfície como em subsuperfície. O teor de P no CN não apresentou acentuada heterogeneidade vertical no perfil, sendo determinados teores entre 1 e 3 mg dm⁻³ de solo. Esses teores são classificados como muito baixos, para todas as camadas de solo avaliadas, de acordo com indicações da CQFS-NRS (2004). É importante salientar que o teor crítico de P para esta classe de solo é de 12 mg dm⁻³. Denotam-se, portanto, valores restritivos ao desenvolvimento vegetal.

No entanto, em áreas cultivadas durante 10 anos sob SPD, a partir da conversão do campo natural para área produtora de grãos, verificou-se o efeito dos sistemas de manejo das culturas hibernais de cobertura do solo e da adubação na melhoria da fertilidade do solo, notadamente dos teores de P. Na camada superficial, de 0-0,05 m, em relação aos teores de P, verificou-se a distinção dos teores em função do manejo da adubação realizada nestas áreas. Enquanto que nos locais onde houve aplicação de fertilizante minerais os teores de P aumentaram para valores próximos a 20 mg dm⁻³, nos solos sob aplicação de fertilizantes orgânicos o teor de P foi superior a 50 mg dm⁻³, ultrapassando os 70 mg dm⁻³ quando da rotação de culturas. De teores considerados muito baixos, no CN, o P passou a apresentar teores altos nos sistemas com aplicação de fertilizantes químicos e muito alto, para a adubação orgânica.

Uma das explicações para diferenças nos teores de P nos tratamentos pode ser a quantidade de P aplicada ao solo no decorrer do tempo de condução do experimento (Apêndice 2). Enquanto nos sistemas com

fertilização mineral foram aplicados aproximadamente 700 kg ha⁻¹ de P, nos sistemas com adubação orgânica foram aplicadas doses superiores a 1.200 kg ha⁻¹. De forma similar ao K, houve maior aporte de P nas áreas com adubação orgânica comparativamente ao uso de fertilizantes minerais, em razão dos critérios de estabelecimento de doses dos fertilizantes, que para a cultura do milho, por exemplo, foi determinada pela demanda de N.

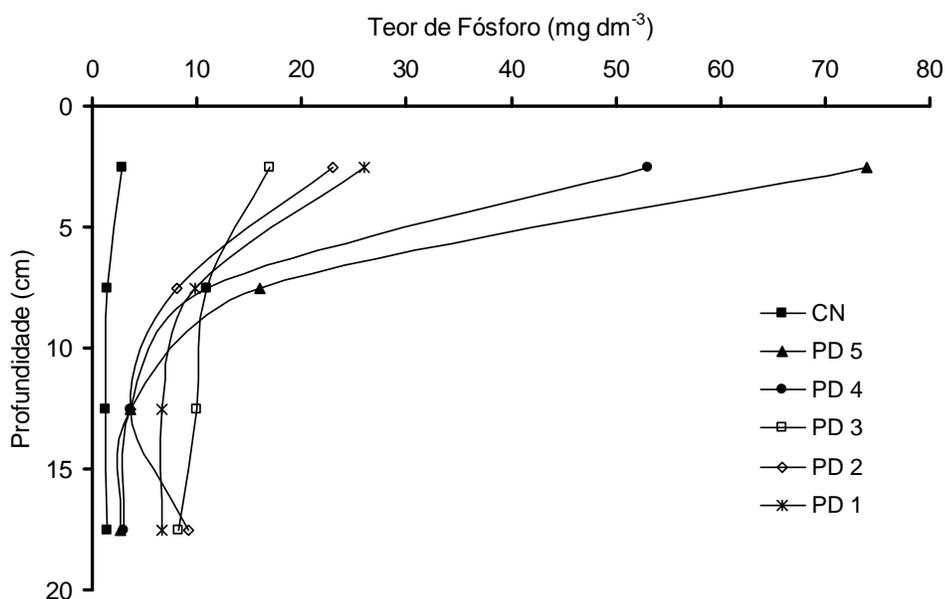


Figura 7. Teor de fósforo (P) no solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Para a camada superficial também foi possível verificar o efeito do manejo das culturas nos teores de P. Os sistemas que utilizam rotação de culturas (PD1 e PD5), tanto quando manejados sob adubação orgânica ou mineral, mostraram ser mais efetivos no aumento dos teores de P, quando comparados com sistemas de sucessão de culturas (PD2 e PD4). De acordo com Corrêa et al. (2004), essa diferença no teor de P nos diferentes sistemas de manejo das culturas de cobertura pode ser explicada em função da composição química de cada espécie vegetal, predominante em determinada área. Para Gaume et al. (2001) o teor de P e sua percolação no perfil do solo

pode estar relacionada à exsudação de ácidos orgânicos, sendo que os mesmos são produzidos de acordo com a espécie vegetal e com estresses que porventura a planta tenha sofrido ao longo de seu ciclo.

Embora o aumento dos teores de P no solo tenha sido mais evidente na camada de 0-0,05 m, nas camadas mais profundas (0,05-0,10, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m), também ocorreu melhoria da fertilidade do solo, quando se compara a área mantida sob vegetação natural com a implementação do SPD. Para estas camadas de solo todos os sistemas de manejo das plantas de cobertura como da adubação apresentaram teores de P superiores aos encontrados no CN. Mesmo assim, em ambos os sistemas de adubação e manejo das culturas, o teor de P permaneceu próximo ou até mesmo inferior ao nível crítico para este solo. Dorneles (2011) e Anghinoni (2006; 2007), no entanto, citam que há uma tendência de redistribuição e aumento do teor de P com o tempo para estas camadas de solo em SPD.

A estratificação química, com formação de gradiente vertical de nutrientes e concentração superficial de P no perfil do solo em SPD se deve principalmente à aplicação dos fertilizantes, à deposição dos resíduos de cultura, ao não revolvimento do solo e reciclagem proporcionada pelas plantas, as quais absorvem o P disponível de camadas mais profundas, deixando-o na superfície quando da decomposição dos seus resíduos. Da mesma forma, de acordo com Selles et al. (1997), o aumento dos teores de P na superfície em sistemas como o SPD pode ocorrer pela redução da superfície de contato entre os sítios de adsorção e os íons fosfato, quando não há revolvimento do solo. Vários outros trabalhos corroboram o acúmulo de fósforo na camada superficial (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Anghinoni, 2006; 2007).

Mesmo que ocorra melhoria da fertilidade do solo em SPD, a alta concentração de P na superfície do solo promovida por este sistema pode aumentar os riscos de contaminação de águas superficiais, como reportado na literatura (Schick et al., 2000; Morais & Cogo, 2001; Bertol et al., 2004a) especialmente em condições de solo apresentando longos comprimentos de rampa, ou sob chuvas de longa duração e elevado volume.

Por outro lado, embora ocorra acúmulo de fósforo a partir da superfície em SPD, também ocorre a descida, embora lenta, deste nutriente no

perfil do solo com o tempo de cultivo (Ceretta et al., 2003; Anghinoni, 2006; 2007; Scherer & Nesi, 2009). Além disso, Salet et al. (1997) citam que o aumento do P em camadas mais profundas deve estar associado ao uso de ferramentas que mobilizam e depositam os fertilizantes em maiores profundidades. Da mesma forma, com o aumento do pH do solo em superfície ocorre uma menor fixação deste elemento com os constituintes minerais do solo, podendo haver uma maior mobilidade deste para camadas mais profundas. Igualmente, a preservação das características físicas do solo no SPD e a existência de canais contínuos, oriundos da decomposição de raízes e da atividade biológica podem ter contribuído para a migração vertical de P na forma orgânica, conforme observaram Eghball et al. (2000).

O efeito dos sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação sobre os valores de saturação por bases (Figura 8) também foi verificado. Como se percebe para os demais atributos químicos do solo avaliados no presente estudo, o valor da saturação de bases também mostrou efeito positivo quando da conversão de área mantida sob vegetação natural para área produtora de grão em SPD.

Na camada de 0-0,05 m, as áreas sob SPD apresentaram substancial elevação da disponibilidade de bases trocáveis. Enquanto que na área sob vegetação natural o valor da saturação dos sítios de carga por bases trocáveis foi de aproximadamente 50%, nas áreas sob SPD esse valor, para todos os manejos das culturas de cobertura e da adubação, foi superior a 75%. Para este atributo, tanto sistemas que utilizam adubação orgânica, como os sistemas que utilizam fertilizantes minerais, apresentaram valores similares de saturação por bases. Essa afirmação também é válida para os sistemas de manejo da plantas de cobertura.

Nas camadas inferiores, de 0,05-0,10, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, também se constatou a tendência de melhoria da fertilidade do solo, em relação à saturação por bases. No entanto, as diferenças dos sistemas de manejo sob SPD em relação à área mantida sob vegetação natural são maiores na camada superficial, decrescendo com o aumento da profundidade. O CN não evidenciou grandes alterações verticais no valor de saturação por bases, permanecendo com valores inferiores a 50%. Para os sistemas sob SPD, a saturação de bases, que na camada superficial foi superior a 75%,

também diminuiu nas camadas mais profundas do solo.

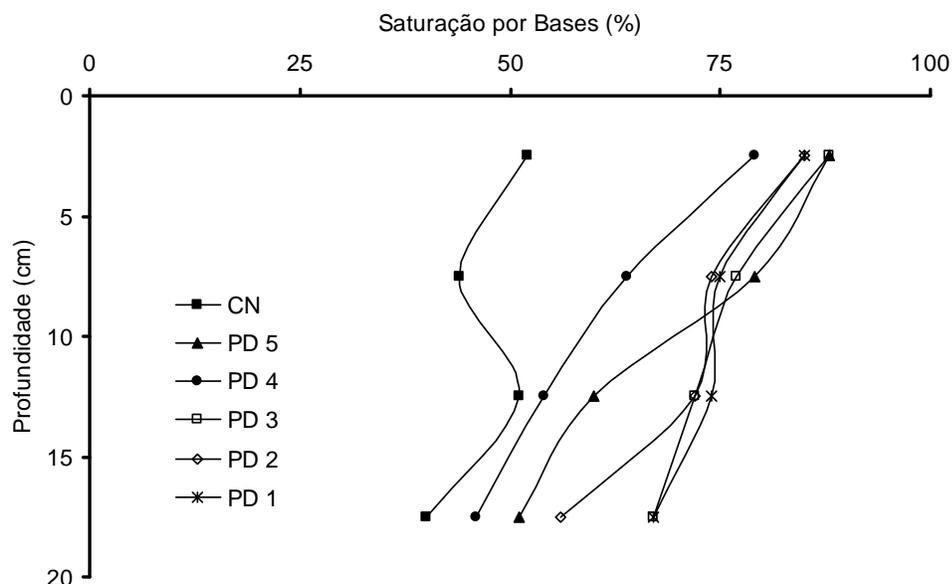


Figura 8. Saturação do solo por bases (V) sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Esse comportamento denota uma clara estratificação química dos primeiros 0,10 m do perfil de solo. Dorneles (2011) cita que esta estratificação pode ocorrer em virtude do acúmulo superficial de Ca, K e Mg provenientes do calcário ou da cama de aviário e da ausência de Al trocável na maior parte do perfil. Bayer (1992) também cita que alterações na CTC, fluxos de água, aplicação de fertilizantes e corretivos e variações na reciclagem de nutrientes podem afetar a disponibilidade de bases trocáveis. Além disso, aumentos da CTC e do pH do solo, promovidos principalmente pelo aumento do teor de matéria orgânica, aumentam a capacidade do solo em reter K e aumentando a saturação por bases, como reportado por (Anghinoni, 2006; Dorneles, 2011).

Como anteriormente visto, os sistemas de manejo das culturas hibernais de cobertura e da adubação, promoveram uma acentuada estratificação química vertical dos nutrientes no perfil do solo, em especial de fósforo e potássio, e dos principais atributos químicos como o pH, CTC, acidez

potencial (H+Al) e saturação por bases (V%). Cabe lembrar, no entanto, que de acordo com a proposição de Anghinoni (2007), o solo estudado ainda se encontra em fase de transição, mesmo sendo cultivado sob SPD há 10 anos.

Nesse sentido, a estratificação vertical de nutrientes com acentuada concentração destes na camada superficial do solo pode ser entendido como um fator limitante transicional a produtividade das culturas, uma vez que o problema principal não reside nas altas concentrações destes nutrientes na superfície, mas sim na desigual distribuição no perfil do solo. A fertilidade da camada subsuperficial, embora igualmente importante, pode ser melhorada com o passar do tempo, principalmente a partir do momento em que os sítios ativos de adsorção de nutrientes estiverem saturados (Rheinheimer et al., 2003).

3.3.2 Teor e estoque de carbono orgânico total do solo

Para as condições ambientais e de manejo do solo e da adubação presentes neste estudo, a análise da variância demonstrou que houve efeito dos sistemas de manejo nos teores de carbono orgânico total (Tabela 3). Embora o teor de carbono orgânico não tenha apresentado diferença estatisticamente significativa, os tratamentos com uso de fertilizante orgânico apresentaram valores de 20,45 e 22,24 g de carbono kg^{-1} de solo, nas áreas manejadas sob sucessão de culturas (PD4) e rotação de culturas (PD5), respectivamente. Isso demonstra um aumento de aproximadamente 20 e 30 %, dos sistemas PD4 e PD5 em relação ao campo natural (CN), evidenciando que a transição do uso do solo de campo natural para área produtora de grãos, sob SPD, pode promover melhorias no teor de carbono orgânico, e conseqüentemente, nas características físico-mecânicas e mineralógicas do solo.

O maior teor de carbono orgânico sob fertilização orgânica pode ser atribuído à maior adição de carbono via aplicação de cama de aviário como fertilizante, que no período de 2000-2010 foi de 11,4 e 12,6 Mg de carbono orgânico ha^{-1} , respectivamente, para sucessão (PD4) e rotação (PD5) de culturas de cobertura (Apêndice 2). Estes resultados corroboram as afirmações de Leite et al. (2003), para qual os sistemas de produção com uso de composto

orgânico podem se constituir em importante estratégia de manejo para a melhoria da qualidade do solo.

Tabela 3. Carbono orgânico total (g kg^{-1}) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	-----g de carbono kg^{-1} de solo-----						
0-0,05	17,16 ^{ns}	16,37	17,77	18,22	20,45	22,24	18,70A
0,05-0,10	12,75 ^{ns}	10,87	11,11	13,33	12,94	11,72	12,12B
0,10-0,15	11,14a	9,42b	9,99ab	10,58ab	10,29ab	10,53ab	10,32BC
0,15-0,20	10,21 ^{ns}	9,01	10,11	9,31	9,64	9,32	9,60C
Média	12,81 ^{ns}	11,42	12,24	12,86	13,33	13,45	-

Valores de carbono orgânico total em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica; PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Em relação ao tipo de cultura de cobertura do solo no inverno, para a camada superficial (0-0,05 m) e a camada adjacente a esta (0,05-0,10 m), também não houve diferença significativa no teor de carbono, sendo que os sistemas de rotação e sucessão de culturas não apresentaram acentuadas diferenças. A ausência de diferenças entre os teores de carbono orgânico para os sistemas de manejo das culturas de cobertura nestas camadas está relacionada às flutuações anuais na produção de fitomassa aérea seca das culturas de cobertura (Cap. V) e possivelmente a semelhante produção de fitomassa do sistema radicular entre os tratamentos.

Na camada de 0,10-0,15 m a análise de variância evidenciou efeitos dos sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação nos teores de carbono orgânico total. O maior teor de carbono orgânico nesta camada foi encontrado no sistema de manejo com manutenção da vegetação natural. O uso do SPD, neste caso, diminuiu os teores de carbono orgânico. Esse comportamento possivelmente deve estar relacionado ao maior aporte de material orgânico em profundidade, através do sistema radicular das espécies que ocorrem no campo natural.

Conceição (2006), em estudos sob manejo do solo com o SPD, indicou que o aumento no teor de carbono orgânico, ocasionado pelo emprego de plantas de cobertura com elevada produção de fitomassa, é reduzido com o aumento da profundidade da camada avaliada. Isso ocorre em função da decomposição da fitomassa aérea se dar na superfície no solo, e em função da restrição do desenvolvimento radicular das plantas de cobertura do solo às camadas superficiais. Da mesma forma, Costa (2008) cita que a distribuição das raízes apresenta alta relação com a distribuição dos nutrientes no perfil do solo. Para este estudo, verificou-se acentuada concentração dos nutrientes na camada superficial do solo em SPD, o que provavelmente tenha promovido semelhante distribuição do sistema radicular, concentrando-se em superfície.

Para a camada mais profunda avaliada neste estudo (0,15-0,20 m), os teores de carbono orgânico apresentaram dinâmica similar à camada subjacente, embora se constatando ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação avaliados. Nesta camada também se torna evidente que a restrição do crescimento radicular no SPD tenha promovido melhorias principalmente nas camadas mais superficiais do solo.

Embora não ocorra implantação de culturas de cobertura no sistema de manejo com pousio na estação invernal, o uso desta prática não mostrou efeito deletério no teor de carbono no solo. Para todas as camadas avaliadas e na média das camadas, o teor de carbono na área com pousio apresentou comportamento similar e intermediário aos demais sistemas. Provavelmente isso ocorra em função do alto restabelecimento natural por espécies espontâneas, principalmente de gramíneas, no sistema de pousio hibernar. Além disso, Sequinatto (2010) cita que o não revolvimento do solo nesse sistema contribui para a diminuição da decomposição do material vegetal pelo ataque microbiano, tanto dos resíduos culturais de superfície, quanto das raízes das culturas remanescentes, o que pode incrementar os teores de carbono orgânico com o passar do tempo.

De modo geral, para a média dos tratamentos em todas as camadas, não houve alteração do teor de carbono orgânico total no perfil do solo, quando se analisa a camada de 0-0,20 m. Entre as camadas, na média dos tratamentos, verifica-se que em relação ao teor de carbono ocorre uma

estratificação vertical deste atributo no perfil do solo, com acentuada concentração na superfície do solo.

A conversão do uso do solo de campo nativo para área produtora de grãos em SPD promoveu efeito sobre o estoque de carbono no solo (Tabela 4). Na camada de 0-0,05 m, percebe-se que houve um aumento de carbono em função das práticas de manejo adotadas. Entre os sistemas de manejo avaliados, a área de campo nativo foi a que apresentou o menor estoque de carbono, enquanto que na área sob SPD manejada com adubação orgânica e rotação de culturas foi a que apresentou o maior estoque de carbono, com valores de 11,03 Mg ha⁻¹ no tratamento CN e 15,65 Mg ha⁻¹ no tratamento PD5. O incremento de carbono no solo, em 10 anos sob SPD, foi na ordem de 4,62 Mg ha⁻¹. Denota-se assim, como citado por Amado et al. (2001) e Costa et al. (2008), que o solo pode funcionar como armazenador de carbono, podendo mitigar danos ambientais ocasionados pela emissão de CO₂. Stürmer et al. (2011) alertam, no entanto, que esse comportamento varia de acordo com a resistência e a resiliência de cada tipo de solo.

Tabela 4. Estoque de carbono orgânico (Mg ha⁻¹) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	----- Mg de carbono ha ⁻¹ -----						
0-0,05	11,03b	11,33ab	11,86ab	12,21ab	13,44ab	15,65a	12,59A
0,05-0,10	9,27 ^{ns}	8,06	7,89	9,45	9,63	8,92	8,87B
0,10-0,15	8,47 ^{ns}	7,30	7,51	8,20	7,48	8,22	7,86B
0,15-0,20	7,86 ^{ns}	7,04	7,73	7,04	7,36	7,17	7,37B
Média	9,16 ^{ns}	8,43	8,75	9,22	9,48	9,99	-

Valores de estoque de carbono orgânico em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Para as camadas subjacentes (0,05-0,10, 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m) não há evidências suficientes para afirmar que as práticas de manejo afetam o estoque de carbono. A análise estatística dos dados mostra que não há diferença estatística entre o estoque de carbono para os tratamentos avaliados,

nas camadas mais profundas do solo. Embora Amado et al. (2001) sugeriram que o uso de leguminosas, combinado com maior diversidade de espécies em sucessão ou rotação de culturas, aumenta a retenção de C no solo, a produção irregular de fitomassa nos sistemas de manejo das culturas em diferentes anos (Cap. V) pode ter contribuído para a ausência de resposta positiva no incremento de carbono no solo nas camadas mais profundas.

Para a média das camadas avaliadas, o estoque de carbono diminuiu significativamente com a profundidade. Enquanto na camada superficial o estoque médio de carbono, considerando os sistemas adotados, foi de 12,59 Mg ha⁻¹, na camada de 0,15-0,20 m, encontrou-se o valor de 7,37 Mg ha⁻¹. A diminuição do estoque de carbono com o aumento da profundidade do perfil e o efeito mais pronunciado dos sistemas de manejo do solo no estoque de carbono, nas camadas superficiais também é reportado por outros autores (Freitas et al., 2000; Freixo et al., 2002). Este comportamento está relacionado ao fato de que as adições de carbono, por meio da deposição de resíduos culturais, ocorrem principalmente em superfície. Nesse sentido, Stürmer et al. (2011) citam que se por um lado, o aumento do carbono orgânico é maior na camada superficial do solo, a mineralização desse carbono também pode ser facilitada pelo seu uso inadequado, comparativamente aquele armazenado nas camadas mais profundas do solo.

Quando se integraliza o estoque de carbono na camada de 0-0,20 m, pelo somatório dos estoques em cada camada, o valor deste atributo no solo foi de 36,62, 33,74, 34,99, 36,90, 37,91 e 39,96 Mg ha⁻¹, respectivamente para os tratamentos CN, PD1, PD2, PD3, PD4 e PD5. Estes valores se apresentam similares ou até mesmo superiores aos valores máximos encontrados por Burle et al. (1997), Diekow et al. (2005), Costa et al. (2008), Vieira (2007), que avaliaram o estoque de carbono em experimento conduzido, respectivamente, por 10, 17, 18 e 19 anos sob SPD com distintas plantas de cobertura, para o mesmo solo. Neste cenário de estudo, os sistemas de manejo com uso de fertilizantes minerais diminuiu o estoque de carbono no solo. Com a manutenção de pousio invernal, o estoque de carbono permaneceu quase inalterado. Em contrapartida, tanto com sucessão quanto com rotação de culturas e fertilização do solo com adubos orgânicos, houve aumento no estoque de carbono. O maior estoque de carbono orgânico neste

sistema de manejo pode ser atribuído à maior adição de carbono no sistema pela aplicação de cama de aviário como fertilizante, que no período de 2000-2010 foi de 11,4 e 12,6 Mg ha⁻¹, respectivamente, nos sistemas de sucessão (PD4) e rotação (PD5) de culturas de cobertura (Apêndice 2).

3.4 Conclusões

1. A fertilização superficial do solo em Sistema Plantio Direto, pelo período de dez anos, proporciona melhorias na fertilidade do solo de tal forma a desenvolver uma acentuada estratificação química vertical do perfil do solo.

2. A estratificação química vertical do perfil do solo convertido de campo natural para área produtora de grãos sob o Sistema Plantio Direto, verificada com o tempo, está notadamente associada à elevação dos teores de matéria orgânica, proveniente dos fertilizantes orgânicos e da produção de fitomassa das diferentes espécies vegetais hibernais utilizadas como cobertura do solo.

3. O manejo da adubação apresenta maior efeito sobre os atributos químicos do solo em comparação ao manejo das culturas hibernais de cobertura do solo.

4. Os sistemas de manejo das culturas de cobertura do solo e da adubação melhoram também os atributos químicos de camadas mais profundas do perfil do solo.

5. Desde que haja variada composição botânica e suficiente produção de fitomassa, sistemas que usam o pousio na estação invernal, melhoram a qualidade química do solo em superfície e subsuperfície em comparação com condições de manutenção do campo natural, contudo sem promover gradiente químico vertical do perfil do solo.

6. O teor e o estoque de carbono orgânico do solo são afetados pelas práticas de manejo das culturas de cobertura do solo e da adubação, ocorrendo sua diminuição com o aumento da profundidade no perfil do solo.

4. CAPÍTULO III. EVOLUÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICO-MECÂNICOS EM UM SISTEMA DE TRANSIÇÃO DE CAMPO NATURAL PARA ÁREA SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

4.1 Introdução

O solo, como base dos sistemas de produção agrícola, sustenta o crescimento vegetal e, conseqüentemente, o rendimento de culturas. Nessas condições, a busca pela qualidade e sustentabilidade do ambiente solo, com vistas à conservação dos recursos do ecossistema passa pelo uso de sistemas conservacionistas que procurem melhorar sua estrutura física, para que este possa exercer as suas funções no tocante ao crescimento e ancoragem das raízes, bem como favorecer o suprimento de água, nutrientes e oxigênio às plantas.

Os sistemas de manejo do solo modificam a sua estrutura física e, conseqüentemente, o desenvolvimento e rendimento de culturas. O advento do SPD promoveu, inicialmente, uma diminuição dos problemas referentes ao alto grau de mobilização do solo, influenciando, entre outros, a perda de solo e água através da erosão hídrica (Borges Filho, 2001; Bertol et al., 2004a). Entretanto, com a modernização da agricultura, o peso das máquinas e a intensidade de uso do solo têm aumentado, resultando em significativas alterações físicas (Streck et al., 2004), principalmente em relação à compactação do solo, que se constitui numa das principais causas da degradação do solo em SPD.

O aumento no grau de compactação do solo é acompanhado por incrementos na sua densidade e resistência mecânica do solo ao crescimento radicular, bem como por alterações na proporção de diferentes tamanhos de poros no solo, sua geometria e continuidade, modificando a capacidade de infiltração e condutividade de água e difusão de gases (Dias Júnior & Pierce, 1996). Nesse sentido, em solos compactados, os efeitos negativos do excesso ou déficit hídrico podem ser mais evidentes sobre o desenvolvimento de plantas (Unger & Kaspar, 1994; Beutler et al., 2005).

Outrossim, a compactação do solo pode interferir nas relações que se estabelecem entre as hastes sulcadoras de adubadoras usadas em SPD e o solo, prejudicando o desempenho das máquinas agrícolas, diminuindo a qualidade do trabalho e aumentando a força de tração exigida pelos equipamentos de mobilização do solo (Tullberg, 2000). Sabe-se que o esforço de tração exigido nas hastes depende, além de suas características construtivas, como ângulo de ataque, largura da ponteira e formato, espessura e ângulo de inclinação da haste (Sánchez-Girón et al., 2005), das características inerentes a cada solo, como a densidade, teor de argila e estrutura, aumentando com o incremento da profundidade de trabalho das hastes (Levien, 1999) e da resistência do solo ao cisalhamento (Sánchez-Girón, 1996).

A área de solo mobilizada pela passagem da haste sulcadora através do solo também é afetada pelas características estruturais do solo e por características inerentes à profundidade de trabalho das hastes, uma vez que sulcadoras estreitas apresentam uma capacidade limitada de atuar com eficiência quando se aumenta a profundidade de operação, devido às inter-relações da haste com o solo e o comportamento de ruptura da estrutura do solo (Godwin & O'Dogherty, 2007).

Algumas pesquisas (Campos et al., 1995; Guimarães & Moreira, 2001; Reichert et al., 2007; Denardin et al., 2008), no entanto, tem evidenciado que a compactação do solo em SPD ocorre principalmente nas camadas mais superficiais, promovendo uma estratificação física vertical no perfil do solo e provocando instabilidades da produção agrícola e frustrações de safra (Fontana & Berlato, 1997; Denardin et al., 2008).

Em razão deste dinamismo dos processos físicos que ocorrem

sistematicamente no solo, para a promoção da sustentabilidade da produção agrícola, torna-se imperativo, portanto, a melhoria da estrutura física dos solos, com conseqüente atenuação dos possíveis efeitos deletérios do tráfego de máquinas e compactação excessiva do solo em lavouras sob SPD.

A literatura documenta, freqüentemente, que o emprego de sistemas de culturas que promovam elevado aporte de fitomassa vegetal com um sistema radicular abundante, e com capacidade de aumentar o teor de matéria orgânica do solo, pode promover o rompimento de camadas compactadas do solo (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005), a manutenção da temperatura do solo e maior conteúdo de água na sua superfície (Pellegrini, 2006), e melhoria da qualidade dos solos degradados (Sequinatto, 2010). Da mesma forma, a atenuação/limitação do tráfego de máquinas e o uso de hastes sulcadoras da semeadora-adubadora para deposição do adubo, atuando a maiores profundidades, podem diminuir o grau de compactação do solo (Botta et al., 2007) e aumentar a produtividade das culturas (Xavier, 2005; Debiasi, 2008).

Nesse cenário, as hipóteses deste estudo para um Argissolo derivado de rochas graníticas localizado na Depressão Central do RS, sob SPD há 10 anos foram: I) a adoção e o uso continuado do SPD, por longo período de tempo, melhoram as condições estruturais, mas contribuem e acentuam a estratificação vertical dos atributos físico-mecânicos do solo; II) as plantas hibernais de cobertura do solo conduzidas em SPD, por aportarem maior quantidade de fitomassa em comparação com sistemas que mantenham a vegetação natural, alteram o sistema poroso e reduzem a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração, principalmente na camada superficial do solo, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento radicular das espécies vegetais; III) o usual e contínuo aporte de material orgânico com elevado pH e concentração de sódio, provenientes da fertilização com adubos orgânicos, quando comparado com a fertilização mineral, acentuam a dispersão de partículas minerais com menor tamanho, transferindo-as para camadas mais profundas do solo; IV) o uso de hastes sulcadoras nas semeadoras, como elementos rompedores de solo, atuando em menor profundidade de trabalho e a ausência de tráfego de rodados

condicionam uma menor área de solo mobilizado e, conseqüentemente, diminuição da demanda de tração requerida pelas máquinas agrícolas.

Para verificar e validar as hipóteses propostas, o objetivo principal deste trabalho foi estudar o efeito do manejo das culturas de cobertura do solo implantadas no inverno, dos modos de adubação, tráfego dos rodados de máquinas agrícolas e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de semeadora nos atributos físico-mecânicos de um Argissolo Vermelho num experimento de longa duração sob conversão de campo natural para área produtora de grãos sob o sistema de plantio direto.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área experimental

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006a), com textura franco-argilo-arenosa (Tabela 5), na camada superficial. Outras informações importantes para o entendimento desse estudo, como o histórico da área experimental, clima, e condução do experimento, são apresentadas no item Material e Métodos, no capítulo II.

4.2.2 Tratamentos

Os tratamentos principais deste estudo consistiram de seis sistemas de manejo das culturas, como reportado no capítulo II: PD1 – rotação de culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e adubação com fertilizantes minerais; PD2 – sucessão de culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e adubação com fertilizantes minerais; PD3 – pousio, sem cultivo de inverno, ocorrendo apenas espécies vegetais de crescimento

espontâneo e adubação com fertilizantes minerais; CN - campo natural, sem adubação; PD4 – sucessão de culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e adubação com fertilizantes orgânicos; PD5 – rotação de culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e adubação com fertilizantes orgânicos (cama de aviário).

Para as avaliações mecânicas, além dos tratamentos principais, foram estudados quatro tratamentos secundários, constituídos por distintas condições de tráfego de rodados do trator e pela profundidade de atuação da haste sulcadora da adubadora-semeadora. A implementação dos tratamentos secundários (Figura 9) foi dada por meio de ajustes mecânicos nas hastes da semeadora.

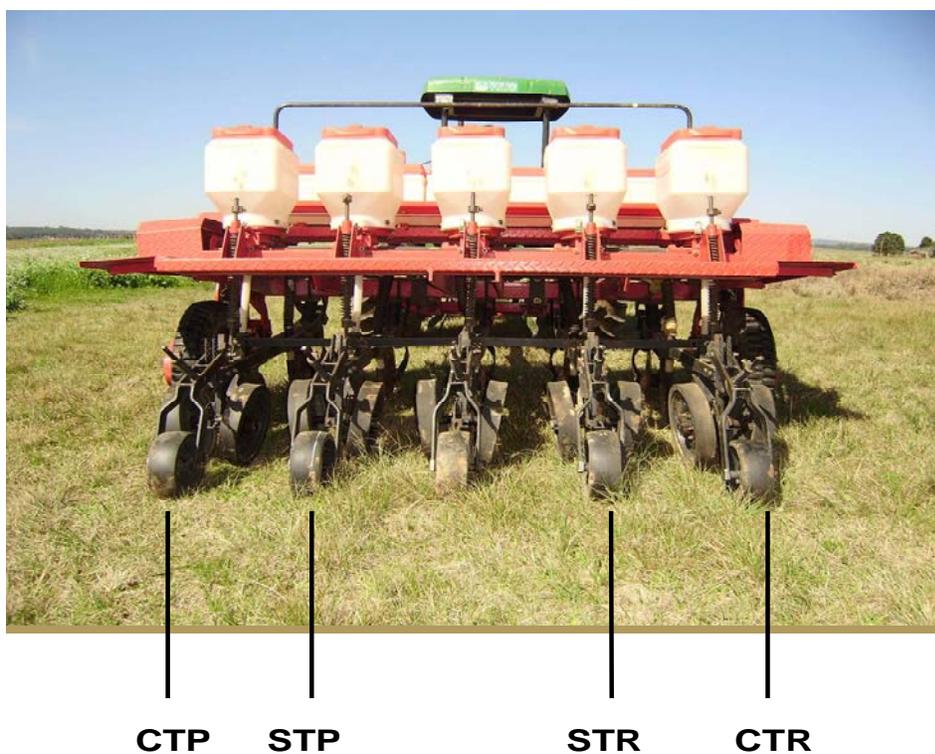


Figura 9. Localização das hastes sulcadoras da semeadora com indicação dos tratamentos secundários avaliados no experimento. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

Outras informações referentes ao histórico da área e tratamentos implantados podem ser obtidas no capítulo II.

Tabela 5. Distribuição granulométrica em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camada (m)	Manejo das culturas e adubação					Média	
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4		PD5
----- Areia (g kg ⁻¹) -----							
0-0,05	460	483	444	452	454	429	454
0,05-0,10	463	472	440	443	454	422	449
0,10-0,15	448	447	442	429	438	406	435
0,15-0,20	426	459	414	429	440	397	428
----- Silte (g kg ⁻¹) -----							
0-0,05	304	304	332	329	308	340	319
0,05-0,10	280	287	314	315	289	311	300
0,10-0,15	289	304	291	302	299	305	298
0,15-0,20	281	266	306	282	259	280	279
----- Argila (g kg ⁻¹) -----							
0-0,05	236	214	224	219	238	231	227
0,05-0,10	257	241	246	242	257	266	251
0,10-0,15	263	249	267	269	263	289	267
0,15-0,20	292	274	280	289	301	323	293

PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

4.2.3 Máquinas e implementos agrícolas

Para a instalação e condução da pesquisa a campo, bem como para a implementação dos tratamentos secundários as operações mecanizadas foram realizadas com um trator marca John Deere modelo 5600, 4x2 TDA; potência máxima do motor de 53 kW (75 cv); massa total de 3835 kg (1530 kg sobre o eixo dianteiro e 2305 kg sobre o traseiro); pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-24 R1, com pressão de inflação respectivamente de 95 e 110 kPa, pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com o solo,

determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999), respectivamente de 115 e 120 kPa, e bitola de 1,65 m nos eixos dianteiro e traseiro.

A implantação das culturas de verão nos anos agrícolas de 2008/2009 e 2009/2010, momento em que foram realizadas as análises mecânicas, foi realizada utilizando uma semeadora-adubadora múltipla (precisão e fluxo contínuo), marca Vence Tudo, modelo AS 11500 montada no sistema hidráulico de 3 pontos do trator, equipada com 5 linhas espaçadas de 0,45 m. Cada linha foi composta por um disco de corte de palha, liso, de 0,356 m (14") de diâmetro, colocado à frente do sulcador de adubo tipo haste, com ponteiros de 0,025 m de largura e ângulo de ataque de 20°; sulcador para sementes do tipo disco duplo, com 0,330 m (13") de diâmetro; e rodas compactadoras dispostas em "V", com 0,305 m (12") de diâmetro. Os dosadores de adubo e de sementes são do tipo rotor dentado horizontal, acionados respectivamente por rosca sem fim e discos horizontais perfurados. Os condutores de adubo são construídos em borracha corrugada e flexível, enquanto que os de sementes, são de plástico e rígidos. Sob a configuração necessária à implantação das culturas de verão, a massa desta semeadora-adubadora equivale 1110 kg.

4.2.4 Análises físico-mecânicas

Para as análises físicas as amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, com sua estrutura não preservada para a determinação da argila dispersa em água, limites de Atterberg, e com a estrutura preservada para a determinação da densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. A coleta das amostras ocorreu nas entrelinhas das culturas, aproximadamente a 0,20 m de distância da linha de semeadura e operação da haste sulcadora da semeadora-adubadora.

4.2.4.1 Distribuição granulométrica

Após secas ao ar as amostras foram peneiradas (peneira com malha de 2 mm), para a obtenção da fração fina de solo (TFSA). Na fração fina

foi determinada a composição granulométrica, após dispersão das amostras com NaOH 1 mol L⁻¹ e agitação mecânica em agitador horizontal por 240 minutos na presença de duas esferas. Após a agitação, as amostras foram passadas em peneira de 0,053 mm. A fração que permaneceu na peneira foi transferida para outro recipiente, secada em estufa a 105°C e quantificada a fração areia. O conteúdo que passou pela peneira foi transferido para proveta de 1000 mL sendo a fração argila determinada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). O silte foi obtido por diferença entre os teores de areia total e argila. Também foram determinados os teores de argila dispersa em água, utilizando-se procedimento similar ao da distribuição granulométrica, suprimindo-se apenas a adição do agente químico dispersante (NaOH).

4.2.4.2 Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada coletando-se três amostras de solo, para cada camada dos tratamentos estudados, com anel volumétrico de aproximadamente 0,06 m de diâmetro e 0,035 m de altura, de acordo com a metodologia descrita por Embrapa (1997). O cálculo da densidade foi realizado utilizando-se a seguinte fórmula:

$$D_s = M_{ss} / V_c, \text{ sendo:}$$

D_s = Densidade do solo (Mg m⁻³);

M_{ss} = Massa de solo seco em estufa a 105°C (Mg);

V_c = volume do cilindro (m³).

4.2.4.3 Porosidade do solo

As mesmas amostras coletadas para a avaliação da densidade do solo também foram utilizadas para a determinação da porosidade do solo. As amostras foram colocadas em mesa de tensão a uma sucção equivalente a 0,60 m de coluna de água, para a distinção de macro e microporosidade.

A microporosidade do solo (Mic) foi calculada considerando que a mesma corresponde à classe de diâmetro de poros que retém a água a uma

sucção equivalente a 0,60 m de coluna de água, utilizando a mesa de tensão.

A fórmula utilizada para este cálculo foi a seguinte:

$$Mic = (Ms60 - Mss) / Vc, \text{ onde:}$$

Mic = microporosidade ($m^3 m^{-3}$);

Ms60 = massa de solo após 72 horas na mesa de tensão a uma sucção de equivalente a 0,60 m de altura de coluna de água (Mg);

Mss = Massa de solo seco em estufa a 105°C por 24 horas (Mg), e;

Vc = volume do cilindro (m^3).

A macroporosidade do solo (Mac) foi calculada através da seguinte expressão:

$$Mac = (Mssat - Ms60) / Vc, \text{ onde:}$$

Map = macroporosidade ($m^3 m^{-3}$);

Mssat = massa de solo saturado (Mg);

Ms60 = massa de solo após 72 horas na mesa de tensão a uma sucção de 0,60 m de altura de coluna de água (Mg), e;

Vc = volume do cilindro (m^3).

A porosidade total (Pt) do solo, por sua vez, foi calculada da seguinte forma:

$$Pt (m^3 m^{-3}) = mac (m^3 m^{-3}) + mic (m^3 m^{-3})$$

4.2.4.4 Limites de Atterberg

Para a determinação dos limites de Atterberg as amostras de solo foram peneiradas com peneira de abertura 425 μm . Do solo peneirado foram retirados aproximadamente 250 g e acondicionados em gral de porcelana. Em

seguida, adicionou-se-lhe água destilada, procedendo-se o processo de mistura com movimentos contínuos de espátula até que se formasse uma pasta homogênea e semi-fluída.

Para a determinação do limite de liquidez, primeiramente foi calibrado o aparelho de Casagrande, utilizando-se o calibrador do aparelho, de 0,01 m de espessura, para verificar a altura do ponto mais elevado à base da concha. Transferiu-se, com uma espátula, parte da amostra de solo homogeneizado para a concha do aparelho de Casagrande e se alisou a superfície, tendo como referência a borda anterior da cápsula, de forma a se obter uma camada com espessura de 10 mm na seção mais profunda. Utilizando-se o cinzel de Casagrande, que foi mantido normal à concha no ponto de contato durante o movimento, foi feita uma ranhura ao longo do plano de simetria da concha. Em seguida, a concha foi colocada no aparelho, evitando-se choques e a manivela foi girada, procurando-se respeitar a razão de duas revoluções por segundo. Os golpes necessários para que as duas bordas inferiores da ranhura se unissem numa distância de aproximadamente 13 mm, ao longo do eixo de simetria foram registrados. Caso o número de quedas estivesse entre 12 e 38, a determinação foi considerada válida e da amostra coletados aproximadamente 20 g de solo junto às bordas que se uniram para determinação da umidade. Para cada tratamento a operação foi repetida 3 vezes para a obtenção de uma média do número de quedas. Tanto o equipamento de Casagrande quanto os procedimentos são normalizados pela ABNT/NBR 6459 (ABNT, 2004).

O limite de liquidez ou limite plástico superior foi representado pelo valor da percentagem de umidade correspondente a 25 pancadas do aparelho de Casagrande. Quando não se obteve precisamente as 25 pancadas para que a fenda se fechasse entre 0,012 e 0,015 m, utilizou-se a seguinte equação para ajuste da umidade:

$$LL = W_n (N/25) * 0,12, \text{ onde:}$$

LL = Limite de liquidez

W_n = Umidade do solo correspondente a N pancadas (%)

N = Número de pancadas da determinação.

Para a determinação do limite de plasticidade e do índice de plasticidade foi utilizada uma parte da amostra de solo, mais ou menos 15g, proveniente da determinação do limite de liquidez para a formação de uma esfera na palma da mão. Com as mãos, a esfera de solo foi rolada sobre uma lâmina de vidro, até formar um cilindro de aproximadamente 3 a 4 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. A amostra foi remodelada até que o cilindro iniciasse a romper quando atingido o diâmetro especificado. Atingida esta condição, os cilindros de solo foram acondicionados em lata de alumínio, e levados à estufa para a determinação de sua umidade. O ensaio é normalizado pela ABNT/NBR 7180 (ABNT, 1982). A operação foi repetida 3 vezes para cada tratamento para a obtenção de uma média das umidades. O limite de plasticidade ou limite plástico inferior foi representado pela umidade da amostra, utilizando-se a seguinte expressão matemática:

$$LP = ((SU - SS) / SS) * 100, \text{ onde:}$$

LP = Limite de plasticidade

SU = Massa de solo proveniente da determinação do LP (g)

SS = Massa do solo seco em estufa (g)

O índice de plasticidade foi calculado pela seguinte expressão:

$$IP = LL - LP$$

4.2.4.5 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada com auxílio de um penetrômetro digital (PLG1020–penetroLOG) da marca Falker, com armazenamento eletrônico dos dados. O equipamento é composto de uma haste metálica, com uma ponteira em forma de cone para a penetração no solo. O cone apresenta um ângulo de 30° em relação ao plano vertical, com uma área basal de 130 mm² e diâmetro da haste de 12,83 mm. A velocidade

de penetração foi constante, aproximadamente 30 mm s^{-1} . A resistência à penetração foi avaliada em dois momentos distintos, diferença de 5 dias entre as leituras, com variação no conteúdo de água do solo, no sentido da obtenção de dados para solo com diferentes umidades. As determinações foram realizadas em transectos, transversais às linhas de semeadura da cultura do milho (Figura 10). As determinações foram realizadas obedecendo-se a distância de 0,05m entre cada amostragem, perfazendo uma leitura diretamente na linha de semeadura da cultura de verão e mais quatro leituras em cada lado da linha.



Figura 10. Esquema de determinação da resistência mecânica à penetração em transectos transversais às linhas de semeadura, com espaçamento de 0,05m entre as amostragens. Eldorado do Sul, 2009.

As amostragens foram realizadas avaliando-se os tratamentos secundários: semeadura utilizando haste adubadora com profundidade de trabalho de aproximadamente 0,15 m e tráfego de rodados do trator na área; semeadura com haste adubadora utilizando profundidade de trabalho de

aproximadamente 0,15 m sem tráfego do rodado na área; semeadura com haste adubadora utilizando profundidade de trabalho de aproximadamente 0,10 m e tráfego dos rodados na área; e semeadura com haste adubadora com profundidade de trabalho de aproximadamente 0,10 m sem tráfego dos rodados do trator na área.

4.2.4.6 Área da seção transversal do sulco produzido pela haste sulcadora para adubo

Para a determinação da área de seção transversal, foi empregado um perfilômetro com 0,35 m de largura, equipado com varetas espaçadas a 0,01 m e deslocamento vertical de 0,35 m (Figura 11).



Figura 11. Vista frontal do perfilômetro instalado transversalmente ao sulco de semeadura. Eldorado do Sul, 2010.

A metodologia envolve a remoção cuidadosa do solo mobilizado na linha de semeadura pelo sulcador de adubo da semeadora, de forma a expor as paredes e o fundo do sulco aberto pela haste. Em seguida, as varetas do perfilômetro, instalado transversalmente ao sulco, são liberadas. O posicionamento relativo entre a extremidade superior das varetas reflete a forma geométrica do sulco, permitindo desenhá-lo em uma folha de papel colocada à frente do painel do aparelho. Algumas varetas, posicionadas nas extremidades laterais do perfilômetro, permitem a localização da superfície do

solo não mobilizado em relação ao sulco. A área da seção transversal do sulco foi determinada realizando-se a integralização matemática de cada área individual das varetas do perfilômetro. Os resultados foram expressos em cm^2 .

A área da seção transversal do sulco foi quantificada realizando-se três leituras em cada linha com três repetições (linhas) por tratamento. Ambas as leituras foram feitas sobre as linhas correspondentes às hastes instrumentadas, sendo uma no sulco aberto sobre a linha de tráfego do trator com haste em profundidade, na linha de tráfego com haste em profundidade de trabalho rasa, outra no sulco referente à área não trafegada, para as duas profundidades de trabalho. A avaliação da área de seção transversal do sulco foi realizada nas hastes instrumentadas para a obtenção de dados que pudessem ser utilizados na determinação de demanda específica de tração.

4.2.4.7 Demanda de força de tração da haste sulcadora para adubo

A força de tração demandada pelas hastes sulcadoras para fertilizante, na semeadura das culturas de verão, foi avaliada por meio de extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*), colados nos suportes das mesmas (Figura 12).

Os extensômetros respondem à deformação micrométrica ocasionada no suporte da haste pela força horizontal que incide na haste, gerando uma diferença de potencial elétrico proporcional à referida deformação, que é transmitida a uma unidade armazenadora de dados (datallogger, modelo CR23X). Através de um software e de uma interface com computador, carrega-se as configurações desejadas no datallogger. Entre essas configurações, encontra-se o coeficiente angular da reta de calibração, que permite ao datallogger armazenar os dados de força de tração diretamente na unidade de interesse (kgf). Para a obtenção da reta de calibração, a haste e o suporte instrumentados são presos a uma estrutura de madeira, de forma a ficarem na posição horizontal. Através de uma corrente presa à ponteira, são aplicados pesos conhecidos (variável dependente) à haste. Para cada peso aplicado, lê-se o valor indicado no display do datallogger (variável independente).

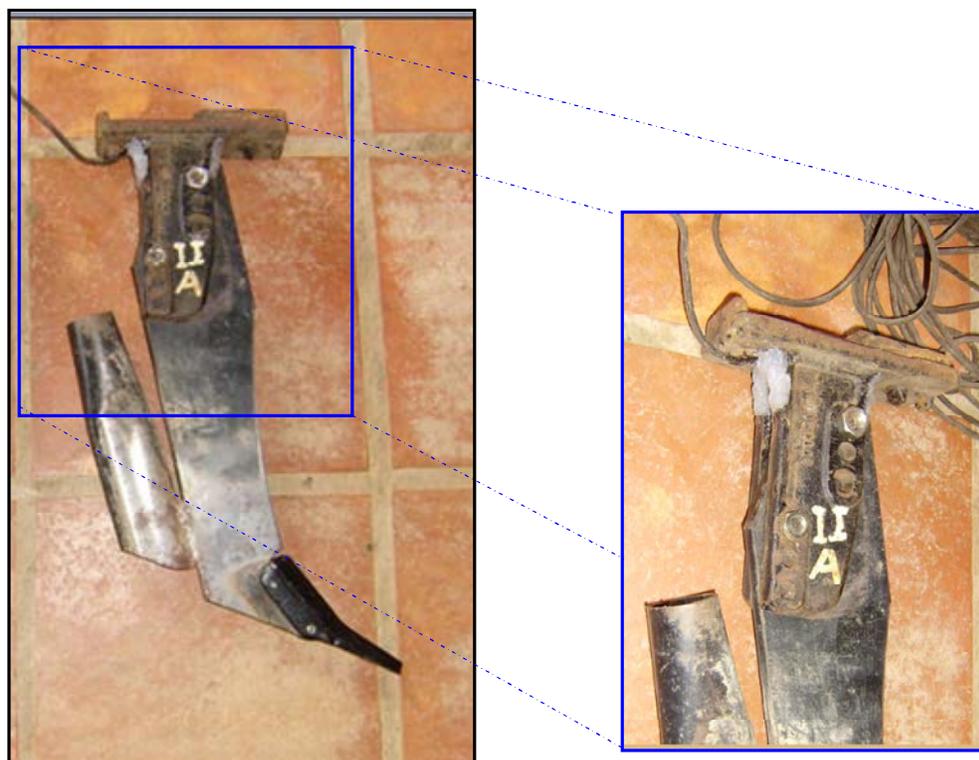


Figura 12. Instrumentação das hastes sulcadoras da semeadora-adubadora, com detalhes da instalação dos extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) para determinação da demanda de tração.

O esforço de tração foi medido em quatro hastes, duas na região central da semeadora e outras duas em sua extremidade, correspondendo, respectivamente, a áreas não trafegadas e trafegadas pelos rodados do trator. As linhas centrais e as extremas foram distinguidas pela profundidade de trabalho das hastes como anteriormente citado. Ressalta-se que os dados de força de tração foram armazenados com uma frequência de cinco leituras por segundo. Para mais detalhes quanto à instrumentação das hastes, consultar CEPIK (2006).

4.2.4.8 Demanda de força de tração específica da haste sulcadora para adubo

A força de tração específica foi obtida dividindo-se os valores de força de tração (N) medida nas hastes pela respectiva área da seção transversal do sulco (cm²) resultante.

4.2.5 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada segundo o delineamento experimental inteiramente casualizado. Os modelos utilizados para a análise da variância (ANOVA) diferiram em função dos parâmetros avaliados. Para todos os modelos utilizados, a ANOVA foi realizada para cada camada avaliada, conforme segue:

Para os dados de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, além de argila natural o modelo utilizado para a análise da variância (ANOVA) foi o de fator único (6 distintos manejos das culturas), com três repetições para cada tratamento. Além disso, as médias de cada camada do solo, tomando como repetição os valores de cada um dos 6 tratamentos e as médias de cada tratamento, utilizando-se como repetição as 4 camadas de solo, utilizaram o mesmo modelo.

Para o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, em cada camada avaliada, o modelo utilizado para a análise da variância (ANOVA) foi o de fator único (6 distintos manejos das culturas), com três repetições para cada tratamento. Para a área da seção transversal do sulco produzido pela haste sulcadora para adubo, a demanda de tração e demanda de tração específica o modelo utilizado para a análise da variância (ANOVA) foi o bifatorial (5 distintos manejos das culturas X atuação das hastes sulcadoras), com três repetições para cada tratamento. Quando a análise da variância indicou a ocorrência de interação significativa (teste F, $p < 0,05$), promoveu-se a comparação de médias através do teste Tukey com 5% de significância. A análise da variância (ANOVA) e os testes de comparação entre médias foram realizados com o auxílio do programa computacional SAS (SAS Institute, 2002).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Análises físicas

Para as condições ambientais predominantes na EEA/UFRGS, no

município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul e para o modo de condução das lavouras em um Argissolo, a conversão do uso do solo de área sob campo nativo para área produtora de grão em SPD, interferiu em alguns dos principais atributos físico-mecânicos do solo.

A quantidade de argila naturalmente dispersa em água (Tabela 6) pode ser um indicador para a confirmação da mudança textural no solo estar ocorrendo em função da dinâmica do processo de intemperismo, com transporte de minerais no perfil do solo. Bagarello et al. (2006) e Denardin et al. (2008) sustentam que a aplicação de fertilizantes que contém grandes quantidades de sódio, um forte dispersante, aumenta a espessura da dupla camada difusa das partículas de menor tamanho e, com isso, promove uma migração destas partículas e sua concentração em camadas mais profundas do perfil do solo. Não se sabe, no entanto, se o efeito dispersante do sódio se sobrepõe ao efeito de cátions como o Ca, Mg e Fe presentes em grandes quantidades neste solo. Albuquerque et al. (2003) citam que a argila dispersa em água pode não aumentar na presença de agentes dispersantes, interferindo na estabilidade estrutural do solo, em função do efeito indireto do maior aporte de resíduos vegetais ao solo, além da própria adição de Ca, por exemplo.

Tabela 6. Argila dispersa em água em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	----- g kg ⁻¹ -----						
0-0,05	25,8 ^{ns}	36,3	42,6	44,9	38,2	47,2	39,2B
0,05-0,10	30,1 ^{ns}	33,4	51,5	57,4	37,3	55,8	44,3AB
0,10-0,15	32,7b	43,4ab	42,4ab	35,8b	57,4a	62,4a	45,7AB
0,15-0,20	37,2 ^{ns}	44,1	61,6	69,2	58,7	67,0	56,3A
Média	31,5b	39,3ab	49,5ab	51,8ab	47,9ab	58,1a	-

Valores de argila dispersa em água em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

A análise estatística para a argila dispersa em água somente evidenciou diferenças significativas entre os sistemas de manejo para a camada de 0,10-0,15 m. Embora sem apresentar diferença estatística significativa, na camada superficial o teor de argila dispersa em água variou de 25,8 g kg⁻¹, na área de campo natural, a 47,2 g kg⁻¹ na área com adubação orgânica e rotação de culturas. Para a camada subjacente (0,05-0,10 m), comportamento semelhante foi verificado, com variação de 30,1 a 57,4 g kg⁻¹ entre os tratamentos que apresentaram o menor (CN) e o maior (PD3) conteúdo de argila naturalmente dispersa. Isso corresponde a uma variação de 90%. Para as camadas de 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m, a variação da argila dispersa também foi a esse percentual.

Numa avaliação sistemática dos dados, porém, percebe-se que a transição do uso do solo da área de campo natural para área produtora de grãos em plantio direto promove alterações nos teores de argila dispersa em água. Os sistemas de manejo das culturas e da adubação evidenciam a ocorrência de efeito dispersivo, alterando a dinâmica deste atributo físico. De modo geral, a adição de fertilizantes orgânicos é uma prática agrícola que influenciou a dispersão da fração argila, promovendo aumento nos teores deste atributo. Esse comportamento ocorre, provavelmente, pela adição de Na e K presente nos fertilizantes orgânicos (Apêndice 3), maior para o sistema com rotação de culturas. De acordo com Spera et al. (2008), o que determina a ocorrência de dispersão ou floculação da fração argila é a espessura da dupla camada difusa. A presença de cátions com alto grau de hidratação, como os íons Na, K, e outros promovem a formação de complexos de esfera externa, aumentando a distância entre as partículas, e contribuindo para a dispersão das partículas.

Por outro lado, variações do pH do solo (Benites & Mendonça, 1998), promovendo valores mais elevados do que o PCZ (Meurer, 2006), fazem com que ocorra maior repulsão eletrostática, diminuindo a floculação da argila. De acordo com Alleoni & Camargo (1994), a redução na carga superficial líquida leva à diminuição na repulsão entre as duplas camadas elétricas das partículas de argila e, conseqüentemente, elas passam a interagir livremente, atraindo-se por forças de Van der Waals, promovendo a floculação das partículas. Nesse sentido, observa-se um comportamento contraditório,

uma vez que o valor de pH para os sistemas com aplicação de fertilizantes orgânicos foi menor que nos sistemas com adubação química (Cap. II), o que levaria a um aumento na floculação. Visto isso, percebe-se a impossibilidade de avaliação dos fatores isoladamente. O que ocorre é que há uma alteração em todo o sistema solo. Mesmo assim, a ação dos íons hidratados parece sobrepujar o efeito do pH do solo na dispersão da argila.

Em relação ao efeito da profundidade no perfil do solo sobre a dispersão da fração argila, percebe-se um aumento nos teores com o aumento da profundidade. Isso se deve, provavelmente, a mobilização do solo pelas hastes sulcadores ser restrita a camadas superficiais do solo e a adição de restos culturais e fertilizantes orgânicos, que promovem maior conteúdo de carbono orgânico em superfície, uma vez que este apresenta efeito aglutinante (Carvalho et al., 1999), diminuindo a dispersão da argila.

Para a densidade do solo (D_s), a análise estatística indicou ausência de diferenças significativas entre os sistemas de manejo estudados em todas as camadas avaliadas (Tabela 7). Assim, não há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grão em SPD promove alterações significativas na densidade do solo com o tipo de maquinário utilizado e umidade em que se realizaram as operações agrícolas.

Analisando os valores de D_s no sistema, para todas as camadas e sistemas de manejo avaliados, verificou-se pequena variação deste atributo. A densidade do solo, entre os manejos adotados, para todas as camadas, apresentou variação próxima a 10%. Na camada superficial a D_s variou entre 1,31 e 1,44 Mg m^{-3} . Estes valores, portanto, estão abaixo dos valores de D_s críticos estabelecidos por Reichert et al. (2003), que para a classe textural do solo desta pesquisa é em torno de 1,45 Mg m^{-3} . Entretanto, para as camadas subjacentes, os valores de D_s encontrados foram superiores ao valor crítico. Mesmo assim a densidade do solo em SPD não diferiu da condição de CN sem pastejo e com menor tráfego de rodados. Provavelmente a umidade do solo no momento das operações agrícolas e o padrão de tráfego nas áreas sob SPD fizeram com que a pressão aplicada pelos rodados (120 KPa) não tenha atingido a pressão de pré-consolidação para este solo, não ultrapassando a resistência deste solo à deformação. Assim, o aumento de densidade não

ocorre de modo significativo.

A ausência de diferenças significativas entre os sistemas de manejo sobre a densidade do solo, na camada superficial, devem estar relacionadas a pressão de contato exercida pelos rodados sobre o solo, enquanto que a compactação subsuperficial está relacionada ao peso sobre os rodados (Sánchez-Girón, 1996; Raper, 2005). Neste sentido, Sánchez-Girón (1996) considera que a compactação só ocorre se a tensão exercida pelos rodados ultrapassar a resistência do solo à deformação. Além disso, a estabilidade estrutural alcançada em função das práticas de manejo do solo, onde há um balanço constante entre a magnitude dos processos que resultam na degradação e aqueles que proporcionam a construção da estrutura (Vezzani, 2001) também pode ter promovido condições adequadas a não manifestação de compactação no solo avaliado.

Tabela 7. Densidade do solo em quatro camadas sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	-----Mg m ⁻³ -----						
0-0,05	1,31 ^{ns}	1,42	1,37	1,37	1,35	1,44	1,38C
0,05-0,10	1,49 ^{ns}	1,52	1,45	1,47	1,52	1,56	1,50B
0,10-0,15	1,55 ^{ns}	1,58	1,54	1,59	1,48	1,59	1,56AB
0,15-0,20	1,57 ^{ns}	1,60	1,56	1,54	1,56	1,57	1,57A
Média	1,48 ^{ns}	1,53	1,48	1,49	1,48	1,54	-

Valores de densidade do solo em cada camada e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Em relação aos sistemas de manejo da adubação não se visualiza diferenças entre a aplicação de fertilizantes orgânicos ou fertilizantes químicos na densidade do solo. No entanto, na avaliação entre os sistemas de manejo das plantas de cobertura, evidenciam-se valores de densidade do solo levemente superiores nos sistemas com rotação de culturas, comparados aos sistemas de sucessão. Embora a produção de fitomassa ter sido irregular durante os anos de condução do experimento, o comportamento de Ds

apresentado pelos dados obtidos podem sugerir que a colheita das plantas de cobertura pode ter contribuído para a obtenção de um aporte menor de material orgânico no sistema com rotação de culturas. Nesse sentido, Sequinatto (2010) cita que o manejo do solo com plantas de cobertura, que incrementem material orgânico ao sistema, acabam diminuindo a DS.

Para o efeito da profundidade no perfil sobre a densidade do solo, percebe-se que, independentemente dos sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação, ocorre um aumento da densidade, em torno de 14%, com o aumento da profundidade. Na média das camadas, a Ds variou de 1,38 Mg m^{-3} para a camada de 0-0,05 m a 1,57 Mg m^{-3} na camada de 0,15-0,20 m. O aumento mais substancial da Ds ocorreu entre as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, que passou dos citados 1,38 Mg m^{-3} para 1,50 Mg m^{-3} .

O comportamento da densidade do solo nas distintas camadas está atrelado ao maior conteúdo de matéria orgânica em superfície, que promove correlação inversa com os resultados de Ds (Braida et. al., 2006; Sequinatto, 2010) e à ação do sistema radicular na superfície. Segundo Braida et. al. (2006) a susceptibilidade à compactação, torna-se menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente no solo. Isso se deve principalmente ao efeito amortecedor da matéria orgânica, que promove a dissipação de parte da energia aplicada ao solo.

Similarmente à densidade do solo, para a porosidade total (Pt), a análise estatística não indicou diferenças significativas entre os sistemas de manejo estudados em todas as camadas avaliadas (Tabela 8). Nesse sentido, não há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grãos em SPD promove alterações significativas na porosidade total do solo.

Para o conjunto de dados apresentados, a variação da Pt foi de 0,36 a 0,46 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Isso corresponde a uma variação de 10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, para a totalidade de situações encontradas, uma diferença de aproximadamente 22%. Esses valores são similares aos obtidos por Sequinatto (2010) para um solo semelhante, alocados sob as mesmas condições ambientais. Quando se compara os tratamentos dentro de cada camada, a variação dos dados não ultrapassou os 5 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (variação de 5-10%). Assim, tanto o manejo das plantas de cobertura quanto o manejo da adubação, nas condições do estudo,

não foram capazes de provocar alterações significativas no sistema poroso.

Tabela 8. Porosidade total em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	-----m ³ m ⁻³ -----						
0-0,05	0,44 ^{ns}	0,44	0,44	0,45	0,46	0,41	0,44A
0,05-0,10	0,41 ^{ns}	0,39	0,39	0,42	0,41	0,38	0,40B
0,10-0,15	0,38 ^{ns}	0,36	0,37	0,40	0,40	0,39	0,38BC
0,15-0,20	0,37 ^{ns}	0,37	0,37	0,37	0,38	0,39	0,38C
Média	0,40 ^{ns}	0,39	0,40	0,41	0,41	0,39	-

Valores de porosidade total em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Para o efeito da profundidade no perfil sobre a porosidade total, independentemente dos sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação, ocorreu uma diminuição de aproximadamente 14% da Pt com o aumento da profundidade no perfil do solo. Isso demonstra que a Pt apresenta comportamento inverso e proporcional à densidade do solo que também variou 14% com o aumento da profundidade. Esses dados também corroboram os dados apresentados por Canellas et al. (2000) que citam que a Pt está intimamente correlacionada ao teor de matéria orgânica no solo, uma vez que o mesmo comportamento foi apresentado neste estudo. Na média das camadas, a Pt variou de 0,44 m³ m⁻³ na camada de 0-0,05 m a 0,38 m³ m⁻³ na camada de 0,15-0,20 m. A diferença mais substancial da Pt ocorreu entre as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, que passou dos citados 0,44 m³ m⁻³ para 0,40 m³ m⁻³.

De modo similar à Ds e Pt, a análise estatística não indicou diferenças significativas para a macroporosidade (Mac) entre os sistemas de manejo estudados, para todas as camadas avaliadas (Tabela 9). Nesse sentido, não há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grãos em SPD promove alterações significativas na macroporosidade do solo.

Com relação à macroporosidade, num panorama geral, abrangendo o conjunto de situações avaliadas, este atributo variou de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondendo a uma variação próxima de 120%. Quando se compara os tratamentos dentro de cada camada, a variação dos dados não ultrapassa a metade da variação geral. Nesse cenário, tanto o manejo das plantas de cobertura quanto o manejo da adubação, nas condições do estudo, não foram capazes de provocar alterações estatísticas significativas no sistema poroso.

Tabela 9. Macroporosidade em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	----- $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ -----						
0-0,05	0,22 ^{ns}	0,20	0,19	0,21	0,23	0,18	0,20A
0,05-0,10	0,17 ^{ns}	0,16	0,16	0,15	0,18	0,15	0,16B
0,10-0,15	0,14 ^{ns}	0,11	0,13	0,16	0,16	0,14	0,14BC
0,15-0,20	0,12 ^{ns}	0,11	0,12	0,10	0,13	0,14	0,12C
Média	0,16 ^{ns}	0,14	0,15	0,15	0,17	0,15	-

Valores macroporosidade em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Com relação ao efeito da profundidade no perfil sobre a macroporosidade, independentemente dos sistemas de manejo das plantas de cobertura e da adubação, ocorreu uma diminuição de 40% na Mac com o aumento da profundidade no perfil do solo. De acordo com Klein (1998) e Camara & Klein (2005) as alterações que ocorrem com a densidade do solo afetam a uma série de atributos físicos do solo, entre os quais a porosidade de aeração é o principal atributo afetado. O efeito negativo desta sobre o desenvolvimento das plantas ocorre por deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular das plantas (Stepniewski et al., 1994). Nesse sentido, os fatores que afetam a densidade do solo afetam também a macroporosidade.

Na média das camadas, a Mac variou de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0-0,05 m a $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,15-0,20 m, com diferença mais

substancial entre as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, que passou dos citados $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Na literatura comumente é relatado que valores menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de poros livres de ar impõem limitações ao pleno desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Tormena et al., 1998). Situação semelhante à relatada é encontrada em camadas mais profundas do solo em questão, o que pode contribuir para a restrição do desenvolvimento, e concentração de raízes na camada superficial do solo.

De acordo com a análise estatística, que indicou ausência de diferenças significativas entre os sistemas de manejo estudados para todas as camadas avaliadas (Tabela 10), não há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grão em SPD promove alterações significativas na microporosidade (Mic) do solo.

A microporosidade, no conjunto de situações avaliadas, variou de $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, uma variação de aproximadamente 23%. Quando se comparam os tratamentos dentro de cada camada, percebe-se que as variações foram menores ainda. Nesse cenário, tanto o manejo das plantas de cobertura quanto o manejo da adubação, nas condições do estudo, não foram capazes de provocar alterações estatísticas significativas nos microporos.

Os valores semelhantes de Mic entre as camadas e os manejos de solo utilizados, levam a crer que o maior volume de Mac (Tabela 9) na camada superficial do perfil do solo, colaborou para a ocorrência de menor Ds e maior Pt nesta camada. Cita-se mais uma vez que isso deve estar relacionado ao manejo do solo, que promove aumento do teor de carbono orgânico especialmente em superfície. Tendência semelhante foi relatada por Debiasi (2008) e Sequinatto (2010), em área experimental sob as mesmas condições ambientais. Em adição, Dias Junior & Pierce (1996) relatam que com o aumento da densidade do solo, ocorre diminuição da porosidade total em função da redução no volume de macroporos, enquanto o de microporos permanece praticamente inalterado. Os dados verificados neste estudo corroboram estas afirmações. Além disso, a pequena variação na microporosidade entre os sistemas de cultivo indica que esta variável é modificada, lentamente, pelo sistema de cultivo, assim como citado por Bertol et al. (2004b).

Como se percebe, diferentemente das características químicas do solo, a conversão do uso do solo de área sob vegetação natural para área produtora de grãos sob SPD, os dados de Ds, Pt, Mac e Mic parecem não dar suporte a hipótese proposta por Denardin et al. (2008) no que se refere à estratificação física vertical no perfil do solo, uma vez que as diferenças encontradas indicam não ser de origem antrópica. Para estes atributos, no décimo ano após a conversão do uso do solo de CN para condução das lavouras sob SPD não houve alterações significativas.

Tabela 10. Microporosidade em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	-----m ³ m ⁻³ -----						
0-0,05	0,22 ^{ns}	0,24	0,26	0,24	0,23	0,23	0,24B
0,05-0,10	0,23 ^{ns}	0,24	0,24	0,27	0,24	0,23	0,24B
0,10-0,15	0,24 ^{ns}	0,25	0,24	0,24	0,23	0,25	0,24B
0,15-0,20	0,26 ^{ns}	0,26	0,25	0,27	0,25	0,25	0,26A
Média	0,24 ^{ns}	0,24	0,25	0,26	0,24	0,24	-

Valores de microporosidade em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

A conversão do uso do solo de área sob campo nativo para área produtora de grãos em SPD evidenciou promover alterações na consistência do solo. Para a camada de 0-0,10 m, os distintos manejos das culturas de cobertura do solo e o manejo da adubação promoveram efeito significativo no limite de liquidez do solo (Tabela 11). Nesta mesma camada de solo, no entanto, a análise estatística mostrou não haver evidências significativas para afirmar que os sistemas de manejo das plantas de cobertura e manejo da adubação promovem alterações no limite de plasticidade e no índice de plasticidade.

Na camada subjacente (0,10-0,20 m), notou-se comportamento distinto da camada superficial. Para esta camada, por meio da análise

estatística, pode-se observar ausência de resposta do limite de liquidez e do índice de plasticidade em função dos sistemas de manejo. Contudo, o limite de plasticidade se mostrou sensível às mudanças de manejo realizadas no solo.

Tabela 11. Limites de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade em duas camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Manejo	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
PD1	27,66b	20,05 ^{ns}	7,61 ^{ns}
PD2	29,04ab	21,13	7,91
PD3	29,72ab	22,01	7,71
PD4	29,63ab	22,31	7,32
PD5	30,54a	22,90	7,64
CN	29,87ab	22,08	7,78
----- 0,10 – 0,20 m -----			
PD1	26,20 ^{ns}	17,75b	8,45 ^{ns}
PD2	27,74	19,46ab	8,28
PD3	28,61	20,26ab	8,35
PD4	28,13	20,44a	7,70
PD5	29,43	19,98ab	9,45
CN	28,26	20,72a	7,55

Valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, em cada camada de solo, seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

O limite de liquidez na camada superficial do solo variou de 27,66 na área sob SPD com rotação de culturas e adubação mineral a 30,54 na área de rotação de culturas e adubação orgânica, um aumento de aproximadamente 10%. Neste caso percebe-se que o tipo de fertilizante, principalmente quando as áreas são manejadas com rotação de culturas, interferem no estado de consistência do solo, mormente no limite de liquidez. A alteração do limite de liquidez do solo em função da adubação orgânica se deve pela maior área de superfície específica da matéria orgânica (Meurer et al., 2006), o que proporciona grande capacidade de retenção de água e aumenta a necessidade de quantidades maiores para a formação de filmes de água ao redor das partículas minerais. Os demais tratamentos tiveram comportamento intermediário aos demais sistemas de manejo.

Nesta mesma camada, tanto o limite de plasticidade, quanto o índice de plasticidade apresentaram variações pouco significativas. Souza et al. (2000) citam que o índice de plasticidade tem estreita ligação com a quantidade de argila no solo. Segundo ele, os valores do índice de plasticidade aumentam na medida em que aumenta o conteúdo de argila do solo. Assim, quanto maior é a relação da superfície total das partículas de argila em relação ao seu volume, maior número de moléculas de água que o solo é capaz de absorver e, por conseguinte, serão mais elevados os valores dos limites de Atterberg. Como não foram observadas alterações na quantidade de argila entre os sistemas de manejo estudados para esta camada é de se esperar a ausência de resposta para o limite de plasticidade.

Para a camada de 0,10-0,20 m somente foram observados efeitos dos sistemas de manejo sobre o limite de plasticidade do solo, que variou de 17,75, na área sob SPD com rotação de culturas e adubação mineral, para 20,72 na área mantida sob vegetação natural. Isso corresponde a um aumento de aproximadamente 16%. A menor plasticidade no tratamento PD1, provavelmente deve estar relacionada a menor quantidade de argila e carbono orgânico observados para este tratamento.

Embora apresentem pequena variação no conteúdo de água no limite de plasticidade e do índice de plasticidade, Souza et al. (2000) citam a importância dos limites de Atterberg como indicador das propriedades e forças físicas envolvidas em problemas de preparo do solo. De acordo com os mesmos autores, solos que apresentam elevada quantidade de argila são muito influenciados pela umidade, o que pode promover alterações nas suas propriedades plásticas. Souza et al. (2000) citam ainda que o grau de consistência do solo exerce considerável influência sobre o a resistência do solo à penetração e compactação, sendo útil para a determinação do momento adequado do uso de técnicas que favoreçam um bom manejo do solo, propiciando melhor conservação do mesmo, além de diminuir a demanda energética nas operações mecanizadas.

Os dados obtidos permitiram definir o Índice de Plasticidade do solo, classificado segundo proposição de Jenkins (Caputo, 1998) como medianamente plásticos ($7 < IP < 15$). Esses resultados revelaram índices de plasticidade coerentes com a distribuição granulométrica, onde a presença de

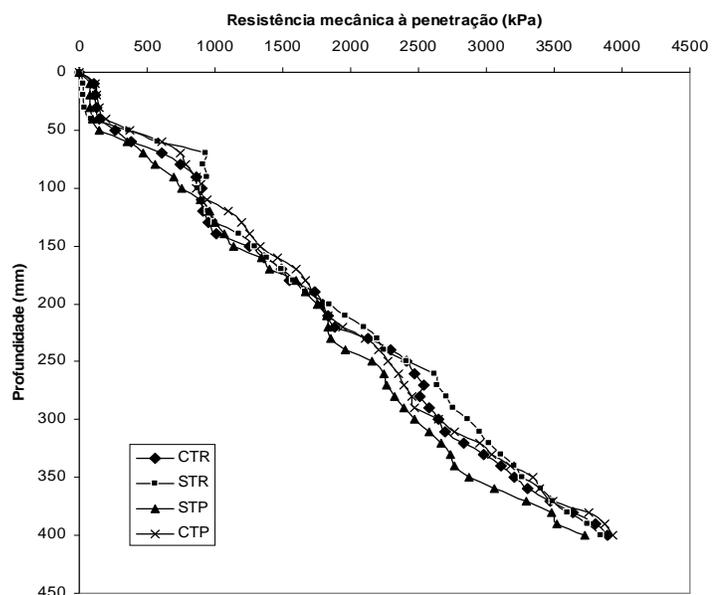
materiais arenosos ou siltosos apresentaram índices de plasticidade baixos, classificados em grande maioria como não plásticos, enquanto em solos com maior porcentagem de argila, o material geralmente apresenta-se medianamente plástico. A plasticidade não muito elevada pode ter contribuído para a ausência de efeito dos sistemas de manejo sobre a densidade e porosidade do solo (Tabelas 7, 8, 9 e 10).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi avaliada sob distintas condições de conteúdo de água no solo, sendo determinada na condição de solo úmido e, cinco dias após esta avaliação, na condição de solo com menor umidade (solo seco). No momento da determinação caracterizada como solo úmido, o solo apresentava, em média, aproximadamente 16% de umidade, muito próxima ao menor limite de plasticidade para os tratamentos avaliados. Já para a condição de solo seco a umidade, de modo geral, se encontrava próxima a 11%.

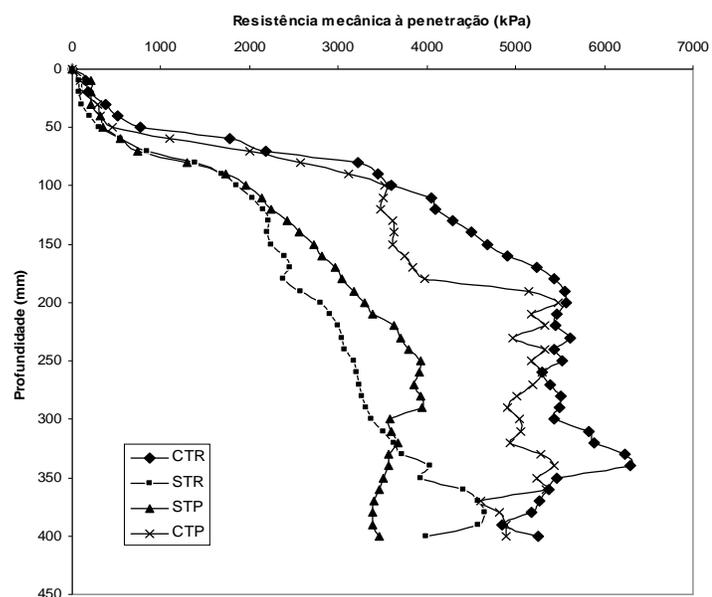
Para o solo manejado com rotação de culturas e aplicação de fertilizantes químicos, a resistência à penetração apresentou comportamento bastante distinto nas duas condições de umidade avaliadas (Figura 13). Na condição em que o solo se encontrava com maior umidade, a resistência mecânica à penetração do solo não mostrou grandes diferenças entre as condições de tráfego e profundidade de trabalho da haste sulcadora da adubadora, impostas ao solo, evidenciando incremento dos valores com o aumento da profundidade. Mesmo com o tráfego de rodados do trator na área, para esta condição de umidade do solo, a RP não diferiu dos demais tratamentos. Neste caso, valores de RP próximos a 2000 kPa, geralmente considerados críticos (Tormena et al, 1998), foram encontrados somente em camadas inferiores aos 0,20 m. Maiores valores de RP foram encontrados na profundidade de 0,40 m, onde os valores de RP foram próximos a 4000 kPa.

Para a condição de solo mais seco, quando a umidade estava em 11%, ocorreu uma diferenciação em dois grupos de tratamentos, ou seja, onde ocorreu o tráfego de rodados das máquinas agrícolas e onde não há o tráfego. Para as áreas trafegadas, independentemente da profundidade de atuação das hastes sulcadoras da adubadora, a RP foi maior que nas áreas não trafegadas. Nesta condição de umidade, nas áreas trafegadas os valores de RP maiores que 2000 kPa foram encontrados aos 0,07 m de profundidade, enquanto para a

área não trafegada isso somente ocorreu próximo aos 0,11 m.



(a)



(b)

Figura 13. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com rotação de culturas e adubação química (PD1), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

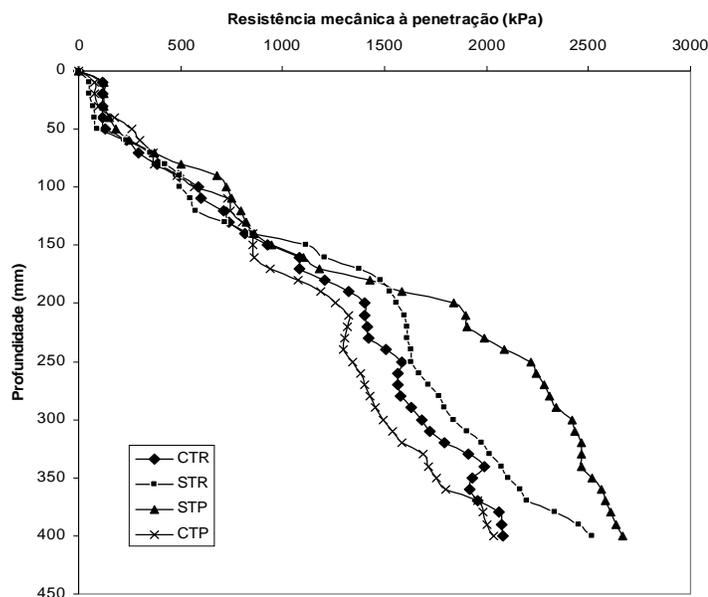
Na condição de menor umidade, para as áreas trafegadas a RP máxima encontrada esteve próxima a 5500 kPa a partir dos 0,20 m de profundidade enquanto onde não ocorreu tráfego os valores médios máximos foram próximos a 3500 kPa também a partir dos 0,20 m de profundidade. Streck et al. (2004) citam que as máquinas agrícolas com elevada carga nos eixos podem causar aumento da resistência mecânica à penetração do solo em profundidades até maiores que 0,30 m. Esse comportamento se deve em função da carga total por eixo (Salire et al., 1994) e da intensidade do tráfego (Streck et al., 2004).

Para a área onde se maneja o solo sob sucessão de culturas e adubação mineral (Figura 14) a RP apresentou comportamento distinto da área com rotação de culturas. Para a condição de maior umidade os tratamentos apresentaram similaridade nos valores até os 0,20 m de profundidade. A partir deste ponto as áreas com restrição de tráfego, independentemente da profundidade de atuação das hastes sulcadoras, apresentaram RP superior às áreas trafegadas. Igualmente, percebe-se uma elevação nos valores de RP com o aumento da profundidade. O aumento da resistência à penetração está associado ao aumento na densidade do solo em camadas mais profundas (Tabela 7). Além disso, Streck et al. (2004) citam que este aumento pode estar associado à diminuição da umidade em camadas mais profundas.

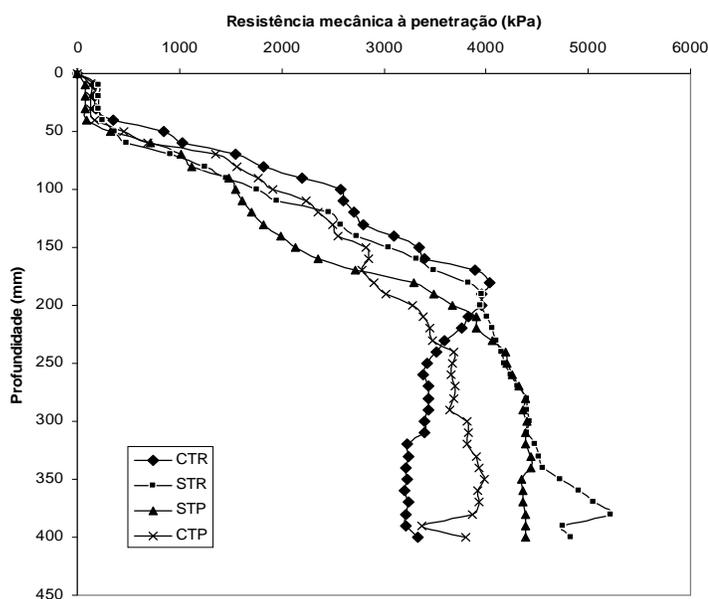
Beutler & Centurion (2003) citam que a resistência do solo a penetração está condicionada à umidade em que o solo se encontra no momento de sua avaliação, onde em solos com condições físicas semelhantes um maior teor de água promove a diminuição da resistência mecânica à penetração. De acordo com Assis et al. (2009) a água presente no solo promove modificações nas condições de atrito entre o cone do penetrômetro e o solo, tornando o solo mais plástico devido à ação lubrificante entre as suas partículas, o que altera os valores de RP.

Para esta condição de umidade, de modo geral não foram encontrados valores restritivos ao desenvolvimento das raízes na camada de exploração radicular. No entanto, em condição de solo mais seco, valores de RP maiores que 2000 kPa já se estabelecem a partir dos 0,10 m de profundidade. Aos 0,20 m a RP já apresenta valores 100% superiores aos 0,10

m de profundidade. Diferentemente da área com rotação de culturas, os tratamentos não diferiram significativamente entre si.



(a)



(b)

Figura 14. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com sucessão de culturas e adubação química (PD2), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

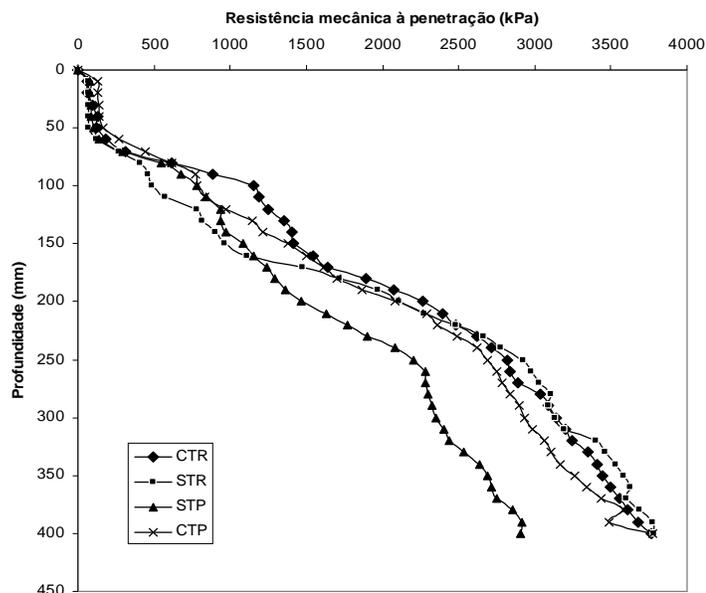
Quando o manejo das plantas de cobertura envolve o uso do pousio na estação invernal (Figura 15) a RP evidencia um aumento linear com o incremento em profundidade, para o solo úmido, de modo similar à área com rotação de culturas e adubação química, apresentando resistência de aproximadamente 3500 kPa na camada mais profunda avaliada. Nesta condição de manejo, a partir do secamento do solo pode ocorrer limitação ao crescimento radicular, uma vez que os valores de RP encontrados em profundidades maiores que 0,20 m se encontram entre 4000 e 6000 kPa.

No entanto, como a RP apresenta forte relação com o crescimento radicular e é muito influenciada pelo teor de umidade e pela condição estrutural do solo, a obtenção de valores limitantes em relação à produção e ao desenvolvimento das culturas é dificultada (Smith et al., 1997). Outrossim, Assis et al. (2009) citam que em condições de solo mais úmido, os valores de resistência do solo à penetração podem ser considerados não impeditivos para o crescimento de raízes.

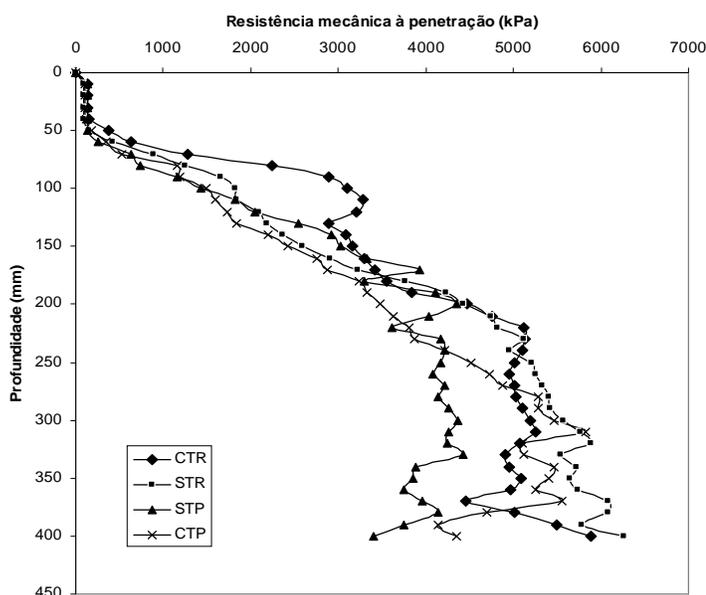
Quando o manejo do solo envolve a utilização de fertilizantes orgânicos, um novo cenário emerge em relação à RP. Para a condição de adubação com fertilizante orgânico associado à sucessão de culturas (Figura 16) independentemente da condição de umidade do solo, percebe-se um aumento linear da RP com o aprofundamento no perfil. Em ambas as situações, os distintos manejos não mostram grandes distinções entre si. Assim como para os demais tratamentos, na condição de maior umidade os valores de RP críticos ao desenvolvimento radicular encontram-se a partir dos 0,20 m. Com a diminuição da umidade no solo esses valores críticos são atingidos próximo aos 0,09 m na ausência de tráfego e hastes sulcadoras atuando em menores profundidades, a partir dos 0,13 m onde ocorre tráfego associado a hastes sulcadoras atuando em menores profundidades, próximo aos 0,16 m onde não há tráfego dos rodados e as hastes sulcadoras atuam em maiores profundidades e aos 0,18 m quando ocorre tráfego na área e as hastes sulcadoras atuam em maiores profundidades.

Percebe-se, portanto, que com relação ao valor geralmente citado na literatura como restritivo ao desenvolvimento radicular (2000 kPa), a ocorrência de tráfego na lavoura faz com que a profundidade de ocorrência desse valor seja menor em comparação com áreas não trafegadas, bem como

a utilização de hastes sulcadoras atuando em maior profundidade pode promover condições físicas mais adequadas ao desenvolvimento das raízes.

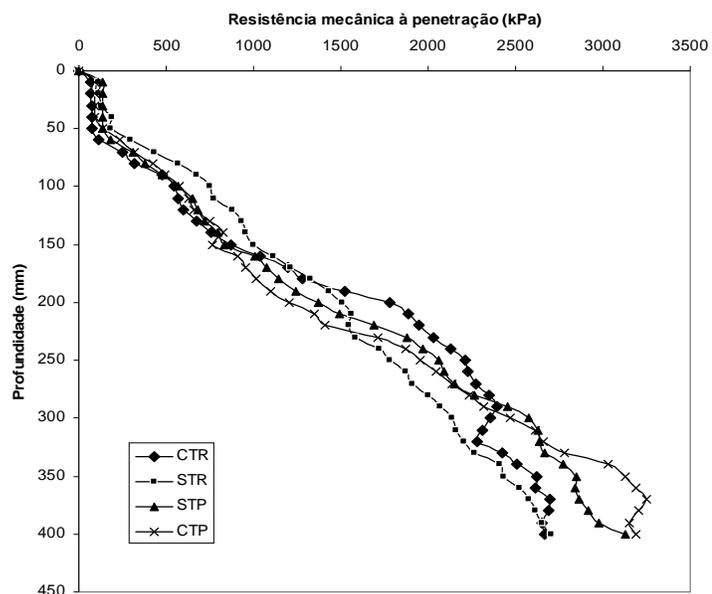


(a)

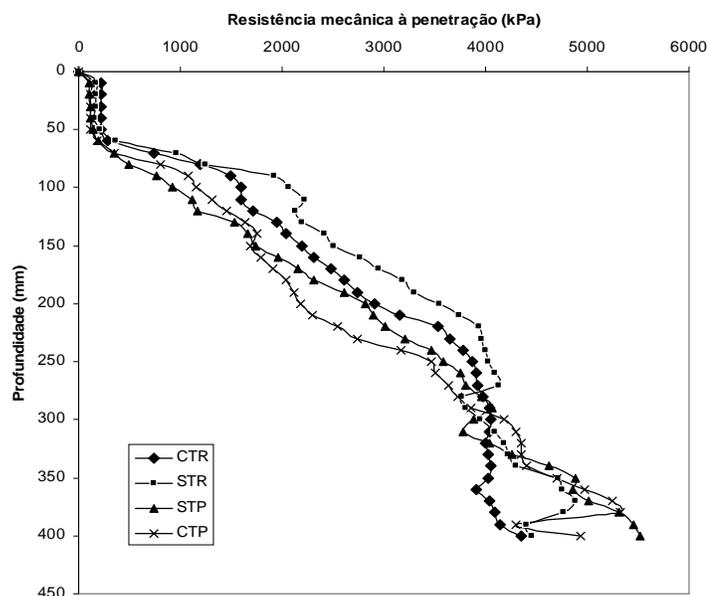


(b)

Figura 15. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área mantida sob pousio invernal e adubação química (PD3), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.



(a)



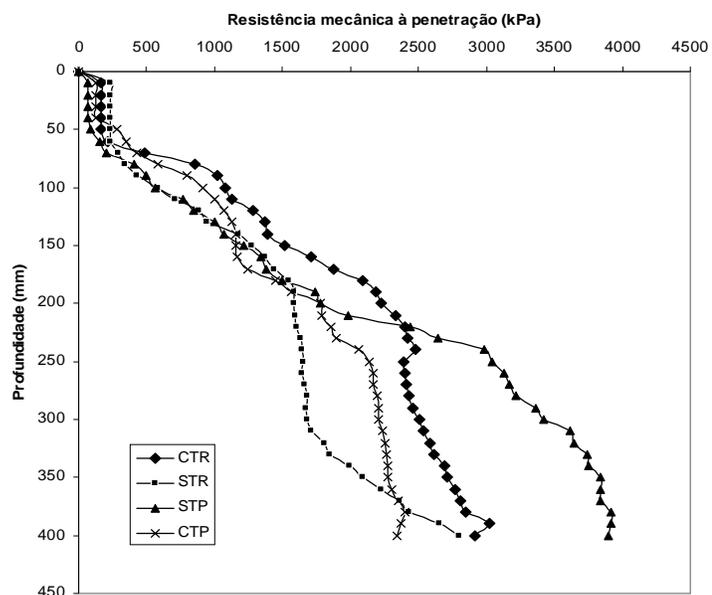
(b)

Figura 16. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com sucessão de culturas e adubação orgânica (PD4), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

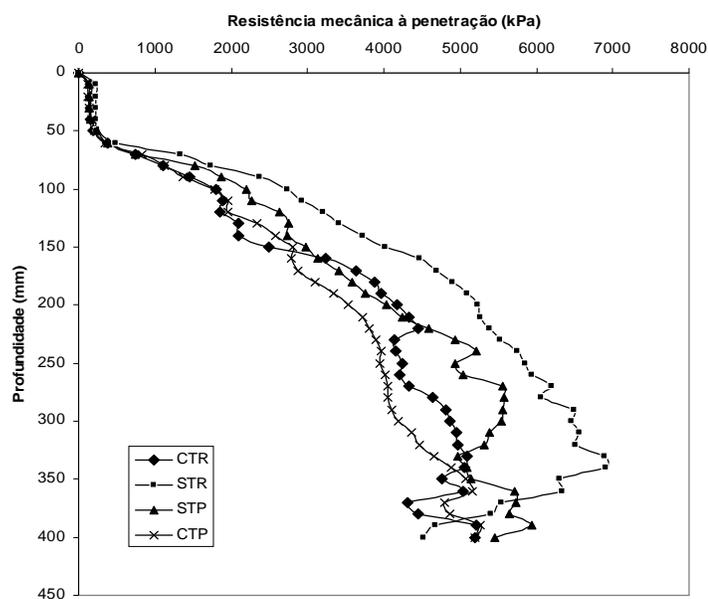
Há de se considerar também que, assim como para os demais manejos do solo, a redução na umidade do solo pode promover um aumento próximo a 100% na RP e promover condições físicas impróprias ao desenvolvimento das culturas. Esses problemas relacionados à elevada resistência mecânica à penetração de raízes, mormente em camadas mais profundas são de difícil solvência e o uso de práticas mecânicas para atenuar os problemas podem se tornar dispendiosos. Assim, como salientam Hakansson & Medvedev (1995), a principal medida para minimizar a compactação do subsolo seria limitar a carga das máquinas e implementos agrícolas e/ou restringir as operações de campo a períodos secos.

Em condições de uso de adubação do solo com fertilizantes orgânicos e rotação de culturas (Figura 17) sob condição de solo úmido, o comportamento da RP é bastante semelhante à área com sucessão de culturas associada a adubação com fertilizante químico mineral. Os valores de RP, no entanto, para este caso apresentam-se superiores. Independentemente da umidade do solo no momento da avaliação da RP, a partir dos 0,20 m de profundidade há uma evidente distinção entre os sistemas de manejo adotados. No entanto, de acordo com o conteúdo de água no solo, há mudanças no sistema de manejo que pode promover mais restrições ao desenvolvimento vegetativo.

Streck et al. (2004) sugerem que quando se compara a RP em diferentes sistemas de manejo, as diferenças apresentadas entre os sistemas de manejo podem ser confundidas com as influências desses manejos sobre o teor de água do solo. Dessa forma, é importante o controle do teor de água na determinação da RP, permitindo, assim, evidenciar os efeitos dos sistemas de manejo sobre a estrutura do solo. Mesmo assim, essas variações de umidade são intrínsecas aos sistemas de manejo e, portanto, também podem e devem ser consideradas nestas análises.



(a)



(b)

Figura 17. Resistência mecânica do solo à penetração em profundidade em área com rotação de culturas e adubação orgânica (PD5), em solo com 16% (a) e com 11% de umidade (b). Eldorado do Sul, 2009. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora e; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

4.3.2 Análises mecânicas

A análise da variância demonstrou que houve interação entre os fatores sistemas de manejo das plantas de cobertura no inverno e sistemas de manejo da adubação com as condições de tráfego e profundidade de atuação das hastes sulcadoras da adubadora para todos os atributos mecânicos avaliados.

Para a área da seção transversal do sulco produzido pela haste sulcadora para adubo (Tabela 12), de modo geral, para o tratamento com rotação de culturas e adubação orgânica, a área de sulco produzido pela haste sulcadora foi menor na comparação com os demais tratamentos. A área média de solo mobilizada pelas hastes variou de 72,7 cm² quando o solo foi submetido a rotação de culturas e adubação orgânica (PD5) até 120,5 cm² para a área com sucessão de culturas e adubação química (PD2), uma diferença de aproximadamente 60%. A menor área mobilizada no tratamento PD5 está associada a maior quantidade de carbono presente neste tratamento (cap. II), que pode promover uma condição de maior estabilidade estrutural a este solo (Sequinatto, 2010).

Tabela 12. Área da seção transversal (cm²) do sulco produzido pela haste sulcadora para adubo em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Condição	Sistema de manejo					Média
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
CTP	124,3 aA	139,5 aA	93,5 aAB	145,1 aA	56,6 aB	111,8 a
STP	138,2 aA	112,0 aA	95,8 aA	87,2 aA	110,6aA	108,8 a
STR	95,0 aAB	106,6 aAB	133,0 aA	98,8 aAB	51,7 aB	97,0 a
CTR	101,5 aA	124,0 aA	102,9 aA	95,4 aA	72,0 aA	99,2 a
Média	114,8 A	120,5 A	106,3 A	106,6 A	72,7 B	-

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica. CTP: com tráfego e haste profunda; STP: sem tráfego e haste profunda; STR: sem tráfego e haste rasa; CTR: com tráfego e haste rasa.

Para as condições de tráfego e profundidade de atuação das hastes sulcadoras, independentemente dos sistemas de manejo adotados, não houve diferença estatística para a área de solo mobilizado, corroborando os dados apresentados por Beutler (2005) e Debiasi (2008). Esse comportamento sugere que embora algumas hastes atuem sob maiores profundidades, o padrão de ruptura e, portanto, o formato do sulco produzido deve ter sido diferente em comparação com a situação em que as hastes tenham sido submetidas a uma atuação menos profunda.

Embora para a área de solo mobilizado a análise estatística não tenha apontado grandes diferenças, os diferentes tratamentos estudados influenciaram a tração demandada pelas hastes sulcadoras da semeadora (Tabela 13). Hastes com maior profundidade de atuação demandaram maior tração, em comparação com hastes que trabalharam mais próximas à superfície, independentemente da condição de tráfego, corroborando, assim, os resultados obtidos por outros autores (Sánchez-Girón, et al., 2005; Xavier, 2005).

Tabela 13. Demanda de tração (N) requerida em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Condição	Sistema de manejo					Média
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
CTP	2833 aA	2621 aAB	2233 aBC	1935 aC	2153 aC	2355 a
STP	2474 aA	2152 bA	2147 aA	2322 aA	2248 aA	2269 a
STR	1264 bA	1228 cA	1177 bA	1168 bA	1212 bA	1210 b
CTR	1191 bA	1073 cA	996 bA	967 bA	1050 bA	1056 c
Média	1941 A	1769 B	1638 BC	1598 C	1666 BC	-

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica. CTP: com tráfego e haste profunda; STP: sem tráfego e haste profunda; STR: sem tráfego e haste rasa; CTR: com tráfego e haste rasa.

A demanda média de tração nas áreas trafegadas e hastes profundas foi de 2.355 N. Já para a área trafegada, contudo, com hastes

atuando em menor profundidade, a demanda de tração foi de 1.056 N, aproximadamente 50% da situação anterior.

Na condição de atuação de hastes rasas, as áreas sem o tráfego dos rodados demandaram maior tração durante a semeadura. Reis et al. (2005) citam que a patinação dos rodados afeta a demanda de tração, uma vez que altera a resistência específica do solo. Esse efeito é menor quando a profundidade das hastes é maior. As formas de adubação (orgânica e mineral) e o manejo das plantas de cobertura (sucessão e rotação), por sua vez, não provocaram alterações significativas na demanda de tração.

A relação entre a força de tração medida na haste sulcadora e a área transversal de solo mobilizado pela mesma, ou seja, a força de tração específica (N cm^{-2}), também foi influenciada pela profundidade de atuação da haste sulcadora, do tráfego de máquinas e pelo manejo da adubação (Tabela 14).

Tabela 14. Demanda de tração específica (N cm^{-2}) requerida em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Condição	Sistema de manejo					Média
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
CTP	24,3 aB	19,5 aB	24,1 aB	13,5 bB	39,3 aA	24,2 a
STP	18,1 aA	19,7 aA	24,5 aA	26,6 aA	20,3 bA	21,8 a
STR	14,0 aAB	11,5 aAB	9,1 bB	12,0 bAB	24,0 bA	14,1 b
CTR	11,9 aA	8,8 aA	10,2 bA	10,2 bA	14,7 bA	11,2 b
Média	17,1 B	14,9 B	17,0 B	15,6 B	24,6 A	-

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica. CTP: com tráfego e haste profunda; STP: sem tráfego e haste profunda; STR: sem tráfego e haste rasa; CTR: com tráfego e haste rasa.

Em relação à profundidade de atuação das hastes, as que atuaram em maior profundidade apresentaram maior demanda de tração específica, em comparação com as hastes atuando em camadas mais superficiais. De modo geral, nas áreas trafegadas a demanda específica de tração nas hastes

profundas foi duas vezes a demanda das hastes rasas. Comportamento similar não ocorreu para as áreas não trafegadas, embora nestes as hastes profundas apresentassem maior demanda específica, a variação não foi tão discrepante, o que vem de acordo com a idéia de Reis et al. (2005), no sentido de que a patinação dos rodados altera a demanda de tração, principalmente em camadas menos profundas.

Para as hastes profundas, a demanda específica de tração foi maior na área trafegada, enquanto que para as hastes rasas o comportamento foi inverso. Neste caso, as áreas não trafegadas apresentaram maior demanda específica de tração.

4.4 Conclusões

1. A adoção e o uso continuado do SPD, por 10 anos, promovem boas condições estruturais ao solo, comparadas ao CN e não promovem estratificação vertical dos atributos físico do solo.

2. A plasticidade não muito elevada aliada ao padrão de tráfego utilizado podem contribuir para a ausência de efeito dos sistemas de manejo sobre a ausência de estratificação vertical no perfil do solo dos atributos físicos.

3. Independentemente do manejo das plantas hibernais de cobertura do solo conduzidas em SPD, não ocorreu significativa alteração dos atributos físicos do solo.

4. O aporte de material orgânico com elevado pH e concentração de sódio, provenientes da fertilização com adubos orgânicos, mormente em sistema de rotação de culturas, acentua a dispersão de partículas de argila na camada de 0-0,20 m.

5. O uso de hastes sulcadoras nas semeadoras, como elementos rompedores de solo, atuando em menor profundidade de trabalho e a ausência de tráfego de rodados promove uma diminuição da demanda de tração requerida pelas máquinas agrícolas.

5. CAPÍTULO IV. ATRIBUTOS MINERALÓGICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO EM EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO

5.1 Introdução

Com o aumento da população mundial e, por conseqüência, um aumento na demanda por alimentos (Silva & Silveira, 2002; Bronick & Lal, 2005), tem sido freqüente a procura por sistemas de manejo que conservem o solo ou que resultem em sua melhoria, no intuito de se encontrar sistemas produtivos que apresentem maior produtividade. Nesse sentido, a importância de escolher sistemas de manejo mais adequados ao solo está na contribuição que podem trazer para a melhoria de suas qualidades, mantendo ou alterando ao mínimo suas características e propriedades (Ribon et al., 2002; Costa et al., 2003). Estas características podem estar relacionadas tanto à composição mineralógica (Ribon et al., 2002; Costa et al., 2003) ou orgânica do solo (Bayer et al., 2003).

A manutenção dos restos culturais das culturas cultivadas tanto no inverno, como das culturas de verão, e a diminuição das taxas de erosão do solo, de água, e carreamento de nutrientes junto com os sedimentos da erosão hídrica são premissas fundamentais do SPD. Este sistema aumenta a disponibilidade de nutrientes e de matéria orgânica, a estabilidade da matéria orgânica e as interações com componentes minerais (Bayer, 1996). Além disso, tem influência na agregação e estabilidade estrutural do solo e nos atributos físicos e químicos (Silva & Mielniczuk, 1998), melhorando, assim, as

condições do solo e, conseqüentemente, contribuindo para a produção agrícola (Schaefer et al., 2001; Cavalieri et al., 2004).

Os solos, com suas diferenças estruturais, apresentam diferentes granulometrias, mineralogias e conteúdo de matéria orgânica, que podem vir a ser modificados pelo seu uso e cultivo (Centurion et al., 2004). Em avançado estado de intemperismo, os solos apresentam intensa perda de sílica, com resultante acúmulo de óxidos insolúveis de Fe e Al (Uehara, 1988). A mineralogia da fração argila dos Argissolos (objeto de estudo deste trabalho) é constituída principalmente por caulinita, óxidos de Fe (hematita e goethita) e menores quantidades de minerais 2:1, combinados em diferentes proporções e associados. Esses minerais são responsáveis pelas cargas elétricas e formação de sítios de adsorção de nutrientes, retenção e distribuição de água, calor e gases no solo. Os óxidos de Fe e Al apresentam qualidades que se traduzem por boas condições físicas proporcionadas aos solos nos quais são predominantes (Vieira, 1988).

Na maioria dos estudos não são observadas mudanças significativas no tipo de minerais presentes no solo em função dos sistemas de manejo adotados, na camada superficial de solos sob SPD. No entanto, as novas condições pedoambientais incluem, em geral, incremento de matéria orgânica, aumento da umidade e do tempo de residência da água, além da diminuição da temperatura do solo (Salton & Mielniczuk, 1995; Costa et al., 2003). Essas mudanças indicam tendência de estabelecimento de um novo equilíbrio dinâmico do sistema solo, diante das alterações mineralógicas graduais que podem ocorrer (Karathanasis & Wells, 1989). Os óxidos de Fe são componentes importantes em solos tropicais e subtropicais e caracterizam-se como indicadores pedoambientais sensíveis (Kämpf & Curi, 2000; Bigham et al., 2002).

Em ambientes aeróbios, o modelo de formação dos óxidos de Fe prevê que estes minerais apresentam alta estabilidade termodinâmica e baixa solubilidade, persistindo no solo por longo período (Schwertmann & Taylor, 1989). Entretanto, aumentos no teor de matéria orgânica, umidade e atividade microbiana favorecem os principais mecanismos de dissolução e remobilização dos óxidos de Fe no ambiente pedogênico, os quais incluem reações de redução e de complexação (Schwertmann, 1991), cuja intensidade é

dependente das condições hidrológicas, principalmente chuva, temperatura e água armazenada.

Nesse sentido, o tipo e a quantidade dos óxidos potencialmente reativos predominantes no solo, como óxidos de Fe e caulinita, a remobilização de óxidos de Fe pedogênicos ou a depleção destes, as relações entre os teores de Fe relativos à totalidade dos óxidos de Fe pedogênicos e dos óxidos de Fe de baixa cristalinidade, bem como sua relação com os teores de C orgânico total e de frações da matéria orgânica, devem ser as variáveis mais afetadas pelas condições de manejo impostas ao solo em estudo.

Em virtude deste cenário, as hipóteses propostas e testadas neste estudo para um Argissolo derivado de rochas graníticas localizado na Depressão Central do RS, sob SPD há 10 anos foram: I) quando comparada com a fertilização mineral, o uso de fertilizantes orgânicos, exclusivamente em superfície, contribui para a concentração de carbono orgânico na camada superficial do solo, o que pode promover alterações na dinâmica da água e temperatura e, conseqüentemente, na dinâmica dos óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos e de baixa cristalinidade no solo; II) sistemas que usam o pousio na estação invernal, em virtude de aporte insuficiente de material vegetal, não agregam suficiente condição para promover alterações significativas na dinâmica do ferro no solo, quando comparado com condições de manutenção do campo natural; III) em virtude de sua alta reatividade a dinâmica dos óxidos e oxihidróxidos de Fe de baixa cristalinidade tem relação mais estreita com o carbono orgânico em comparação com os teores totais de ferro pedogênico.

Para testar as hipóteses propostas, o objetivo principal deste trabalho foi estudar o efeito do manejo do solo, das culturas de cobertura no inverno e da adubação nos teores de ferro em óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos e de baixa cristalinidade presentes em um Argissolo Vermelho num experimento de longa duração sob conversão de campo natural para área produtora de grãos sob o sistema de plantio direto e verificar sua relação com os teores e estoque de carbono orgânico.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 A área experimental

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006a), com textura franco-argilo-arenosa, na camada superficial. Outras informações importantes para o entendimento desse estudo, como o histórico da área experimental, clima, e condução do experimento, são apresentadas no item Material e Métodos, no capítulo II.

5.2.2 Tratamentos

Os tratamentos principais deste estudo consistiram de seis sistemas de manejo das culturas, como reportado no capítulo II: PD1 – rotação de culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e adubação com fertilizantes minerais; PD2 – sucessão de culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e adubação com fertilizantes minerais; PD3 – pousio, sem cultivo de inverno, ocorrendo apenas espécies vegetais de crescimento espontâneo e adubação com fertilizantes minerais; CN - campo natural, sem adubação; PD4 – sucessão de culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e adubação com fertilizantes orgânicos; PD5 – rotação de culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e adubação com fertilizantes orgânicos (cama de aviário).

5.2.3 Análises mineralógicas

5.2.3.1 Extração de ferro em óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (Fed) e de baixa cristalinidade (Feo)

O Fed equivale às formas presentes nos óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos, incluindo aqueles cristalinos, de baixa cristalinidade e não cristalinos, como a hematita, goethita, lepidocrocita e ferrihidrita. Alguns trabalhos mostram a possibilidade de extração de pequena concentração de frações litogênicas (McKeague et al., 1971).

O Fed, de uma amostra de TFSA de 0,2g, foi extraído com solução aquecida a 80° C, de citrato tribásico de sódio dihidratado, como agente complexante, tamponada a pH 7,3 pelo bicarbonato de sódio, à qual foi adicionado, fracionado em três vezes, 3g de ditionito de sódio em pó ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) como agente redutor. Após a centrifugação a 3000 rpm por 10 minutos, o sobrenadante retirado e o Fe proveniente dos minerais dissolvidos foi determinado no extrato por espectrofotometria de absorção atômica (Embrapa, 1997). Esse procedimento segue o descrito por Mehra & Jackson (1960).

O Feo foi extraído de uma amostra de 0,2g de TFSA com oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ em meio ácido (pH 3), no escuro, devido à formação de complexos após a dissolução de óxidos e oxihidróxidos de Fe de baixa cristalinidade do solo, tais como ferrihidrita e lepidocrocita. A solução foi agitada horizontalmente por 120 minutos e centrifugada a 3000 rpm. Após a centrifugação o sobrenadante retirado e o Feo foi determinado no extrato por espectrofotometria de absorção atômica (Embrapa, 1997). O procedimento para extração de Feo segue os princípios estabelecidos por Schwertmann (1964).

5.2.3.2 Relação entre ferro e carbono orgânico

Para estabelecer a relação existente entre os teores de ferro em óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (Fed) e de baixa cristalinidade (Feo) com os teores e estoque de carbono orgânico total (Cap. II), foi realizada uma análise de regressão entre estes parâmetros e os resultados apresentados em

figuras com a respectiva relação e o coeficiente de determinação da função que estabelece a relação entre as duas variáveis avaliadas.

5.2.4 Análise estatística

Para os dados das distintas formas de ferro extraídas das amostras de solo o modelo utilizado para a análise da variância (ANOVA) foi o de fator único (6 distintos manejos das culturas), com três repetições para cada tratamento. Além disso, as médias de cada camada do solo, tomando como repetição os valores de cada um dos 6 tratamentos e as médias de cada tratamento, utilizando-se como repetição as 4 camadas de solo, utilizaram o mesmo modelo.

Quando a análise da variância indicou a ocorrência de efeito significativo (teste F, $p < 0,05$), promoveu-se a comparação de médias através do teste Tukey com 5% de significância. A análise da variância (ANOVA) e os testes de comparação entre médias foram realizados, seguindo o delineamento inteiramente casualizado, com o auxílio do programa computacional SAS (SAS Institute, 2002).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Análises mineralógicas

Para as condições ambientais e condições de condução do presente estudo, a análise estatística indicou efeito significativo dos sistemas de manejo estudados para o teor de ferro em formas de baixa cristalinidade (Feo) em três das quatro camadas do solo avaliadas (Tabela 15). Nesse sentido, há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grãos em SPD promove alterações significativas na mineralogia do solo até a camada de 0,15 m. Baldock et al. (1992) citam que os efeitos dos sistemas de manejo sobre atributos mineralógicos podem ser de ordem qualitativa, tanto quanto de ordem quantitativa, como por exemplo, as modificações das quantidades dos óxidos

potencialmente reativos, como óxidos de Fe e caulinita.

Para a camada superficial (0-0,05 m) o teor de ferro em formas de baixa cristalinidade variou de 1,6 a 2,2 g kg⁻¹ de solo, onde o menor teor foi encontrado para a área mantida sob vegetação natural e o maior teor para o sistema com adubação orgânica e rotação de culturas. Os demais tratamentos apresentaram teores entre semelhantes e intermediários a estes dois sistemas. Para o efeito isolado dos sistemas de manejo da adubação ou do manejo das plantas hibernais de cobertura, por sua vez, não há evidências suficientes para afirmar que ocorram alterações no teor de ferro em formas de baixa cristalinidade. Percebe-se, portanto, que as alterações na mineralogia do solo são um processo complexo e que não dependem de apenas uma variável. Schwertmann & Taylor (1989) também citam a alta estabilidade termodinâmica dos óxidos de Fe em pedoambientes aeróbios, fazendo com que estes persistam no solo por longos períodos.

Entretanto, segundo Schwertmann & Taylor (1989), os óxidos de Fe de baixa cristalinidade, como lepidocrocita e ferridrita apresentam maior área superficial específica e maior reatividade química do que as frações mais cristalinas, o que pode ter contribuído para as alterações ocasionadas. O efeito diferenciado para os tratamentos PD4, com adubação orgânica e sucessão de culturas, e o PD5, com adubação orgânica e rotação de culturas, pode ser atribuído ao processo de colheita anual das culturas hibernais. Na colheita a fitomassa das culturas sofre um processo de picagem da palha, que reduz o tamanho das partículas vegetais e facilita o ataque microbiano. Quanto mais rapidamente a matéria orgânica se estabiliza, mais rapidamente poderá promover interações organominerais, condicionando a dinâmica do ferro no solo. De acordo com Zanelli et al. (2007) quando há uma rápida taxa de decomposição da vegetação aumenta-se o teor de Fe relativo a óxidos de Fe de baixa cristalinidade.

Inda Júnior et al. (2007) também citam que os teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade têm papel determinante na estabilidade dos complexos organominerais. Nesse sentido, Coelho & Vidal-Torrado (2003) afirmam que o maior conteúdo de matéria orgânica em camadas superficiais pode ser responsável pela habilidade de complexar o Fe e estabilizar a ferridrita, inibindo, assim, sua transformação para formas mais estáveis de

óxidos de ferro (Schwertann & Taylor, 1989).

Para as camadas subjacentes, 5-10 e 10-15, o comportamento do ferro em formas de baixa cristalinidade é similar à camada superficial. Entretanto, para a camada mais profunda não foram observadas diferenças estatísticas para este atributo mineralógico, não havendo evidências suficientes para afirmar que os sistemas de manejo afetam este atributo em camadas mais profundas. Esse comportamento deve estar atrelado à ausência de significativas alterações químicas (Cap. II) e físicas (Cap. III) em camadas mais profundas, sob os sistemas de manejo avaliados.

Tabela 15. Ferro em formas de baixa cristalinidade extraído com oxalato de amônio (Feo) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	-----g kg ⁻¹ de solo-----						
0-0,05	1,6b	1,7ab	1,7ab	1,6ab	1,6ab	2,2a	1,7A
0,05-0,10	1,9ab	1,3b	1,7b	1,8ab	1,7ab	2,3a	1,8A
0,10-0,15	1,3b	1,5b	1,7ab	1,7ab	1,7ab	2,1a	1,7A
0,15-0,20	1,2 ^{ns}	1,4	1,4	1,5	1,4	1,6	1,4A
Média	1,5b	1,5b	1,6b	1,7b	1,6b	2,1a	-

Valores de ferro em formas de baixa cristalinidade em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Num cenário geral, até os 0,20 m de profundidade, quando é avaliada a média dos tratamentos, nota-se que somente onde se aplicam fertilizantes orgânicos e o manejo das plantas de cobertura ocorre no sistema de rotação, há alteração no teor de ferro em formas de baixa cristalinidade. Silva Neto et al. (2008) também citam que o SPD não afetou os teores médios de Feo na camada de 0–0,20 m em solos formados sob climas tropicais e subtropicais. No entanto, para a média das camadas, independentemente dos tratamentos avaliados, não se evidenciam alterações substanciais para este atributo mineralógico, uma vez que somente para a camada de 0,15-0,20 m há uma pequena diminuição em seu teor. Mesmo que parte do ferro amorfo seja potencialmente capaz de mobilizar-se aos horizontes inferiores (Coelho &

Vidal-Torrado, 2003), esse comportamento não foi observado.

Com relação ao teor de ferro pedogênico (Fed) a análise estatística indicou efeito dos sistemas de manejo estudados somente na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 16). Assim, não há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grãos em SPD promove alterações significativas neste atributo, na maior parte do perfil do solo.

Para a camada superficial o teor de ferro pedogênico no solo variou de 10,9 g kg⁻¹ de solo na área sob SPD com rotação de culturas e adubação mineral (PD1) para 12,5 g kg⁻¹ na área com adubação orgânica e rotação de culturas (PD5). Similarmente, para todas as demais camadas, o tratamento PD1 apresentou os menores teores de ferro pedogênico.

Tabela 16. Ferro presente nos óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (Fed) extraído com solução de ditionito, citrato e bicarbonato em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas						Média
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
	-----g kg ⁻¹ de solo-----						
0-0,05	11,9 ^{ns}	10,9	11,6	11,6	11,0	12,5	11,6B
0,05-0,10	12,4a	10,5b	12,5a	12,3a	12,8a	11,9ab	12,1AB
0,10-0,15	13,2 ^{ns}	11,1	13,4	13,2	14,7	12,4	13,0A
0,15-0,20	13,8 ^{ns}	11,6	13,0	13,6	12,3	13,6	13,0A
Média	12,9 ^{ns}	11,0	12,6	12,6	12,7	12,6	-

Valores de ferro em óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Para o efeito da profundidade, quando é avaliada a média das camadas, nota-se um leve acréscimo no ferro pedogênico com o aumento da profundidade. Esses dados evidenciam relação positiva com a profundidade indicando incrementos de 12 % no teor de Fed entre a porção superior (0–0,05 m) e a porção inferior (0,15–0,20 m) do perfil do solo. Dados semelhantes foram encontrados por Silva Neto et al. (2008) que encontraram variações próximas a 18% para este atributo em profundidade. Já para o efeito dos

sistemas de manejo das plantas hibernais de cobertura, independentemente das camadas avaliadas, visualizou-se a ausência de resposta significativa na alteração do ferro pedogênico em função do uso do solo.

Para a relação entre a totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos e a quantidade de óxidos em formas de baixa cristalinidade a análise estatística dos dados indicou efeito dos sistemas de manejo estudados, por meio de diferenças significativas entre 0,05 e 0,15 m no perfil do solo avaliado (Tabela 17). Portanto, há evidências suficientes para afirmar que a conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grãos em SPD promove uma mobilização e um reordenamento dos minerais presentes no perfil do solo avaliado.

Tabela 17. Relação entre os teores de ferro presente nos óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (Fed) e os teores de ferro em formas de baixa cristalinidade (Feo) em quatro camadas do solo sob diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Eldorado do Sul – 2010.

Camadas (m)	Sistemas de manejo das culturas					Média	
	CN	PD1	PD2	PD3	PD4		PD5
	-----g kg ⁻¹ de solo-----						
0-0,05	7,5 ^{ns}	6,5	6,8	7,1	6,7	5,7	6,7B
0,05-0,10	6,6ab	8,2a	7,4ab	6,7ab	7,4ab	5,2b	7,0B
0,10-0,15	9,8a	7,3ab	7,7ab	7,9ab	8,4ab	5,8b	7,4AB
0,15-0,20	11,2 ^{ns}	8,4	9,6	9,2	8,5	8,6	8,9A
Média	8,8 ^{ns}	7,6	7,9	7,7	7,7	6,3	-

Valores de relação entre os teores de ferro pedogênicos e os teores de ferro em formas de baixa cristalinidade em cada camada de solo e médias dos tratamentos seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e média das camadas seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ^{ns} - Não significativo. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica; CN – Campo nativo.

Nas camadas mais extremas do perfil do solo (0-0,05 m e 0,15-0,20 m) não foi verificada diferença estatística entre os sistemas de manejo. Já nas camadas de (0,05-0,10 e 0,10-0,15 m) a relação entre as diferentes formas de ferro foi alterada em função do manejo proposto. De modo geral e para o efeito isolado dos sistemas de manejo da adubação ou do manejo das plantas hibernais de cobertura a área conduzida sob rotação de culturas e adubação

orgânica apresentou a menor relação entre a totalidade de ferro pedogênico e suas formas de baixa cristalinidade, indicando que este sistema favorece as formas de ferro que apresentam maior área superficial específica e maior reatividade química no solo. Em contrapartida, o sistema que permaneceu sob vegetação natural apresentou maiores valores para esta relação, o que pode indicar condições mais propícias à formação de minerais mais cristalinos com maior estabilidade estrutural, e, por consequência, um sistema mais estável.

A alta relação entre a totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos e os óxidos de baixa cristalinidade pressupõe a predominância de óxidos de Fe cristalinos (hematita e maghemita) com baixos teores de ferrihidrita, e consequentemente, um maior grau de cristalinidade dos óxidos presentes neste solo. Mesmo que com aumento nos teores de MOS com a implantação do SPD, a CTC do solo (Cap. II) em níveis apenas médios pode estar relacionada à mineralogia com elevada cristalinidade dos óxidos e hidróxidos de ferro.

Além de uma mobilização de Fe ao longo do perfil indicada pelo aumento do Fed em profundidade, pode estar ocorrendo um reordenamento dos minerais predominantes no solo, assim como citado por Silva Neto et al. (2008), em função do aumento significativo da razão Fed/Feo (37%) com o aumento da profundidade. Os mesmos autores citam que essas transformações ocorrem devido às intensas de chuvas nesta região, que propiciaria microambientes redutores em condições não perturbadas do SPD, os quais levariam à dissolução dos óxidos de Fe e posterior carreamento para camadas mais profundas e neoformação.

Embora o modelo de formação dos óxidos de Fe suponha que os minerais apresentam alta estabilidade termodinâmica e baixa solubilidade, aumentos no teor de matéria orgânica, umidade e atividade microbiana podem favorecer os principais mecanismos de dissolução e remobilização dos óxidos de Fe no ambiente pedogênico, os quais incluem reações de redução e de complexação (Schwertmann, 1991).

Mesmo que ainda pouco estudada, Schwertmann & Taylor (1989) citam que a remobilização de óxidos de Fe pedogênicos ou a depleção estão relacionadas às modificações nas características químicas do solo. Em relação a estabilidade dos complexos organominerais, o tipo e à intensidade de

interações mineral-matéria orgânica-mineral (Stevenson, 1994) bem como os teores de matéria orgânica (Inda Júnior et al., 2007; Silva Neto et al., 2008) são fatores que determinam a estabilidade e por conseqüência, a quantidade desses componentes na estrutura do solo.

Em virtude deste cenário estabeleceu-se a relação entre o teor e a distribuição do Fe relativo à totalidade dos óxidos de Fe pedogênicos (cristalinos e de baixa cristalinidade) e aos óxidos de Fe de baixa cristalinidade com os teores de carbono orgânico total e o estoque de carbono no perfil do solo (Figura 18).

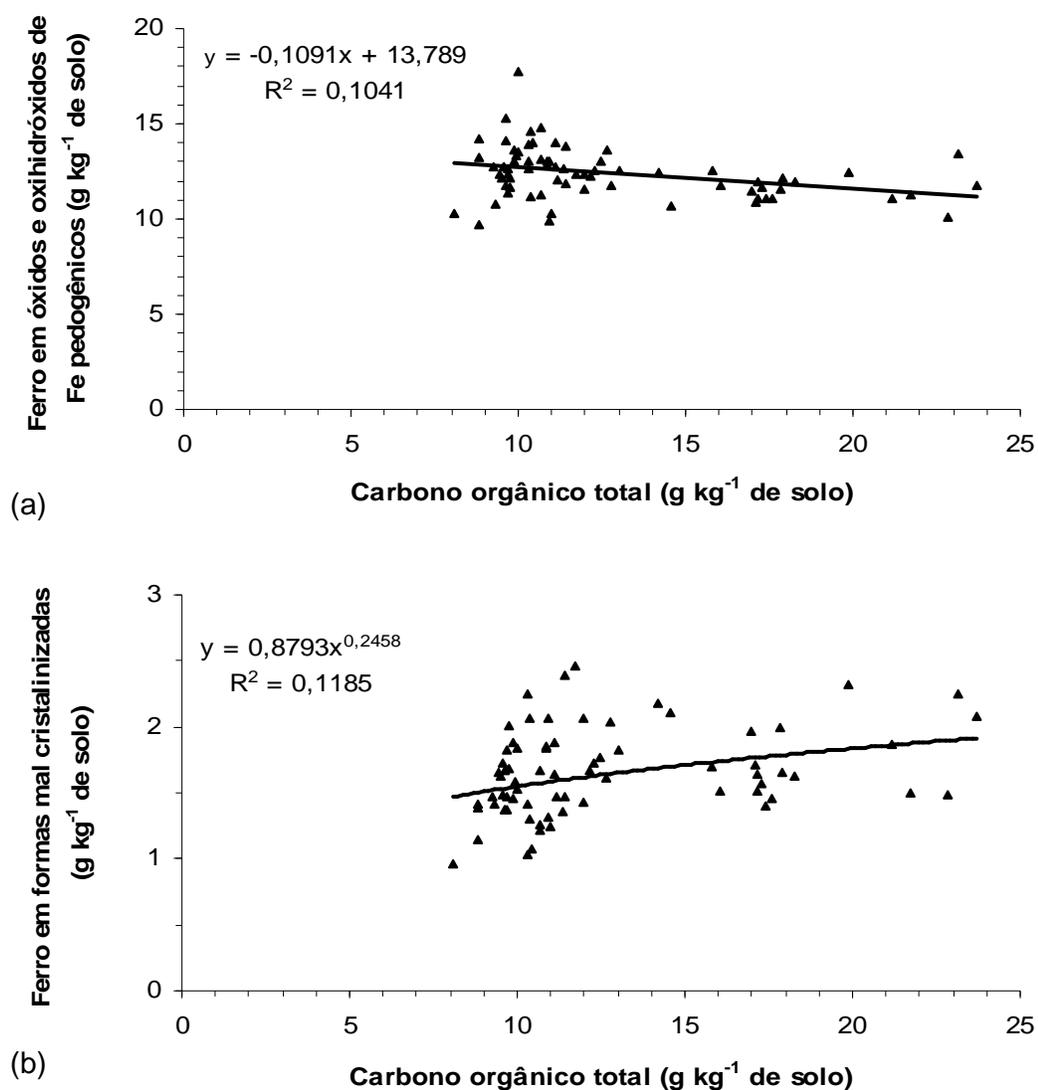


Figura 18. Relação entre os teores de carbono orgânico total em distintos manejos do solo e os teores de ferro em óxidos e oxihidróxidos de Fe pedogênicos (a) e de baixa cristalinidade (b). Eldorado do Sul – 2010.

O teor de carbono orgânico no solo apresentou uma relação negativa com a totalidade dos óxidos de ferro pedogênico, contudo positiva com o teor de ferro relacionado às formas de baixa cristalinidade. Assim, na medida em que aumentam os teores de carbono orgânico, não há um aumento correspondente de ferro pedogênico. Entretanto, embora não apresentem uma relação significativa, com o aumento do carbono orgânico no solo ocorre um aumento paralelo das formas de ferro com baixa cristalinidade. Como se percebe, aproximadamente 12 % da variação do ferro em formas com baixa cristalinidade pode ser explicada pelo conteúdo de carbono orgânico no solo.

Essa relação entre o teor de CO e as formas de ferro com baixa cristalinidade deve-se ao fato de que a matéria orgânica apresenta grande quantidade de grupos funcionais que apresentam uma capacidade de estabelecer interações com os grupos funcionais presentes na superfície dos minerais (Cornejo & Hermosín, 1996).

As frações amorfas de ferro no solo podem proporcionar uma medida da atividade dos componentes (Schwertmann & Taylor, 1989), uma vez que estas correspondem às frações quimicamente mais ativas dos óxidos e oxiidróxidos (Chao & Zhou, 1983) e, por isso, o teor de carbono orgânico pode estar influenciando na distribuição das formas de ferro no solo.

5.4 Conclusões

1. A conversão do uso do solo de área mantida sob campo natural para área produtora de grãos em SPD promove alterações significativas na distribuição e formas de ferro predominantes no solo.

2. Isoladamente, o manejo da adubação e o manejo das plantas hibernais de cobertura têm contribuição pouco expressiva na distribuição e formas de ferro predominantes no solo.

3. A estratificação química vertical do perfil do solo, com alterações no teor de carbono orgânico no perfil do solo apresenta relação mais estreita com a dinâmica dos óxidos e oxiidróxidos de Fe de baixa cristalinidade em relação aos teores totais de ferro pedogênico, em virtude da maior reatividade das formas amorfas de ferro.

6 CAPÍTULO V. PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE VERÃO INFLUENCIADA PELOS ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICO-MECÂNICOS E MINERALÓGICOS DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

6.1 Introdução

Os sistemas de manejo do solo compreendem práticas indispensáveis ao bom desenvolvimento das culturas e se caracterizam por um conjunto de técnicas que, se racionalmente utilizadas, podem proporcionar altas produtividades das culturas. Atualmente, o sistema plantio direto representa o manejo conservacionista de solo e de culturas com maiores níveis de adoção no País. Huggins & Reganold (2008) mostram que dos quase 95 milhões de hectares com SPD no mundo, aproximadamente 25 milhões de hectares cultivados sob este sistema estão no Brasil, sendo considerada a segunda maior área plantada no mundo sob o sistema plantio direto (SPD). Esse cenário representa uma grande conquista em termos de preservação do meio ambiente visto que em áreas sob SPD as perdas de solo por erosão hídrica são reduzidas (Cogo, 1981; Cogo et al., 2003) e os teores de matéria orgânica são mantidos ou aumentados, principalmente na camada superficial do solo (Bayer & Schneider, 1999; Lovato et al., 2004), promovendo uma série de melhorias no ambiente solo (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Amado et al., 2001).

A consolidação do SPD, por sua vez, está essencialmente alicerçada na rotação de culturas, com inclusão de espécies com elevado potencial de produção de fitomassa vegetal e dotadas de um sistema radicular abundante (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005), para promover cobertura permanente de solo, gerar benefícios fitossanitários, melhoria da fertilidade integral do solo e rompimento de camadas compactadas do solo. Dessa forma, a integração da rotação de culturas ao abandono da mobilização de solo e a manutenção permanente da cobertura de solo assegura uma gradativa evolução dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Bayer & Mielniczuck, 1997; Silva et al., 2007; Sequinatto, 2010).

Um dos grandes entraves para a consolidação do SPD no Brasil, em virtude da baixa mobilização do solo e ao intenso e inadequado tráfego de máquinas, neste sistema de produção, é a compactação do solo, que pode ser prejudicial ao desenvolvimento de plantas, dependendo do grau que atinge e da capacidade do sistema radicular de diferentes espécies de plantas em romper as camadas adensadas (Sequinatto, 2010).

A compactação excessiva do solo tem sido reconhecida como uma importante causa de redução do rendimento das culturas de grãos (Beutler & Centurion, 2004; Beutler et al., 2005; Botta et al., 2007) em função das alterações físicas ocasionadas ao solo, como aumento de densidade, resistência mecânica à penetração (Imhoff, 2002; Silva, 2003), mormente próximo ao ambiente radicular das culturas produtoras de grãos (Leão, 2002).

Uma das alternativas encontradas e documentadas na literatura para atenuar a compactação do solo reside na diminuição do tráfego agrícola e o uso de hastes sulcadoras da semeadora-adubadora para deposição do adubo, atuando a maiores profundidades. Há evidências de que estas práticas diminuam o grau de compactação (Botta et al., 2007; Debiasi, 2008) e tenham efeitos positivos sobre o rendimento de culturas (Xavier, 2005; Sequinatto, 2010).

Outra dificuldade relacionada ao SPD é a produção suficiente de fitomassa para a cobertura permanente do solo. Além da quantidade de fitomassa, a resistência à decomposição da palhada é outro fator importante, e que está relacionada principalmente com a relação carbono/nitrogênio (C/N) das culturas (Pitol, 1993). Igualmente, o manejo da palhada com corte ou

manutenção da planta inteira sobre o solo mudam a dinâmica da decomposição e permanência da palhada sobre a superfície do solo. Nesse sentido, torna-se imperativo, para promover uma efetiva cobertura do solo, a seleção de espécies, para o cultivo em sucessão/rotação, que proporcionem diversidade botânica ao sistema (Spehar, 2001).

Para o SPD, usualmente são utilizadas espécies de leguminosas em função de sua capacidade de fixação do nitrogênio atmosférico, de seu sistema radicular profundo, e relação C/N favorável à decomposição (Bayer et al., 1998; Aita et al., 2001). Plantas de outras famílias como as gramíneas também podem ser utilizadas com essa finalidade, principalmente porque a relação C/N mais elevada dessa família de plantas implica em maior permanência dos resíduos no solo, favorecendo o estabelecimento da cobertura (Ceretta et al., 2002). Além disso, a elevada capacidade de absorção de N das gramíneas pode reduzir os riscos de contaminação do lençol freático com nitrato e aumentar a ciclagem de N durante a entressafra das culturas comerciais (Amado et al., 2002).

Outro fator inerente aos sistemas produtivos agrícolas e que afeta a produtividade das culturas é o manejo da adubação. Em geral, para culturas anuais, os fertilizantes minerais são aplicados na linha de semeadura ou a lanço. Para os fertilizantes fosfatados e potássicos, a aplicação deve ser realizada na linha de semeadura, próximo do sistema radicular, favorecendo sua disponibilidade às plantas, diminuindo o caminho que o nutriente precisa percorrer no solo para que possa ser absorvido e também sua adsorção às partículas coloidais do solo (Ceretta et al., 2007).

Devido sua natureza física e equipamentos disponíveis para a distribuição, os fertilizantes orgânicos, principalmente os esterco, são aplicados a lanço em toda a superfície. Atualmente, a adubação orgânica, principalmente quando da utilização de esterco, é feita sobre a camada de palha existente no PD e deixada na superfície do solo. Isto impede ou retarda o contato do adubo com o solo e microrganismos, influenciando sobre a condição de mineralização dos compostos orgânicos, dinâmica dos nutrientes e sua absorção pelas plantas (Scherer & Nesi, 2009).

A utilização de resíduos orgânicos na adubação traz como benefícios o aumento da concentração de matéria orgânica do solo, associado

à contribuição para a melhoria nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Além de fornecer nutrientes, os resíduos orgânicos, dependendo da quantidade utilizada, podem contribuir para a agregação do solo, melhorando a estrutura, a aeração, a drenagem e a capacidade de armazenamento de água (CQFS-NRS, 2004), resultando no aumento da produtividade das culturas.

Tendo em vista o dinamismo das relações que se estabelecem no solo sob SPD, o estabelecimento e a sustentabilidade deste sistema, de acordo com Vernetti Junior et al. (2009), estão subordinados à ação dos fenômenos naturais e ao manejo dos fatores inerentes ao sistema, como o manejo do solo e das culturas de cobertura, requerendo, portanto, ações integradas, como a correção da fertilidade do solo, a descompactação do solo, quando necessária, manejo do solo com utilização de rotação de culturas e controle da erosão do solo.

As hipóteses principais deste estudo, em vista ao exposto, são: I) As plantas de cobertura de inverno, com maior aporte de fitomassa seca em comparação com áreas mantidas em pousio, aumentam a produtividade das culturas produtoras de grãos no verão; II) A utilização do sistema de rotação de culturas em sistema plantio direto, com maior diversidade botânica, produz maior quantidade de fitomassa seca e, conseqüentemente, promove maior produção das culturas de verão quando comparadas a área com sucessão de culturas, uma vez que a presença de plantas fixadoras de nitrogênio e com sistemas radiculares profundos e abundantes promove ciclagem de nutrientes, beneficiando as culturas de verão; III) Sistemas de manejo do solo que utilizam fertilizantes orgânicos aumentam os teores de matéria orgânica do solo promovendo melhorias nas condições físicas do solo, atividade biológica e ciclagem de nutrientes o que afeta de modo positivo o rendimento das culturas de verão; IV) Áreas de solo onde ocorre o tráfego do rodado do trator apresentam menor rendimento de grãos das culturas do milho e da soja, em relação ao solo não trafegado, uma vez que pode ocorrer compactação nestas áreas; V) A utilização de hastes sulcadoras nas semeadoras-adubadoras atuando em maiores profundidades melhora o ambiente físico de crescimento radicular e, conseqüentemente, promove incrementos no rendimento das culturas do milho e da soja.

Para testar essas hipóteses, o objetivo desse estudo foi determinar o

efeito do manejo das plantas de cobertura de inverno, do tipo de fertilizante utilizado para adubação do solo, do tráfego de rodados do trator e da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora, dentro do sistema de manejo do solo com sistema plantio direto, sobre o rendimento das culturas do milho e da soja.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 A área experimental

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Embrapa, 2006a), com textura franco-argilo-arenosa, na camada superficial. Outras informações importantes para o entendimento desse estudo, como o histórico da área experimental, clima, e condução do experimento, são apresentadas no item Material e Métodos, nos capítulos II, III e IV.

No dia 02/12/2008 foi semeada a cultura do milho utilizando-se a cultivar Agrocere 5011. Foram semeadas três (3) sementes por metro, com linhas espaçadas a 0,45m, totalizando aproximadamente 67.000 sementes para a obtenção de 60.000 plantas por hectare. De acordo com AGROCERES SEMENTES (2011), as principais características da cultivar são boa qualidade de colmo e tolerância a doenças foliares. Esse conjunto de características agronômicas possibilita um excelente desempenho do AG 5011 na produção de grãos e também de silagem de planta inteira com alto valor energético, porque apresenta alta participação de grãos na massa ensilada. O milho AG 5011 tem ciclo precoce, apresentando porte médio de planta, com bom empalhamento e excelente desenvolvimento do sistema radicular, o que pode proporcionar boa tolerância às estiagens e permitir uma melhor adaptação nos plantios da safrinha e nos plantios do tarde, além de boa produtividade. O florescimento do milho ocorreu após aproximadamente 80 dias de ciclo, enquanto que a colheita foi aos 136 dias após a semeadura.

Para a safra agrícola de 2009/2010, no dia 09/12/2009 foram semeadas 20 sementes por metro de soja cultivar BRS 243RR, em linhas espaçadas a 0,45m, totalizando aproximadamente 380.000 sementes para a obtenção de 300.000 plantas por hectare. De acordo com Embrapa (2006b), a BRS 243RR é uma cultivar de soja geneticamente modificada para resistência ao herbicida glyphosate. Tem como características principais a cor do hilo marrom, a flor branca e a pubescência marrom. É resistente ao cancro da haste, à mancha “olho de rã”, à podridão parda da haste e ao vírus da necrose da haste. A época de semeadura recomendada para esta cultivar estende-se de 25/10 a 10/12. A maturação é considerada precoce. O florescimento da soja ocorreu a aproximadamente 50 dias após a semeadura, enquanto que a colheita da soja se deu no dia 30/04/2010, tendo a cultivar completado um ciclo de 143 dias.

As principais espécies das plantas encontradas nos diferentes tratamentos, tanto na safra agrícola 2008/2009 como na safra 2009/2010, são mostradas no Quadro 1. Outras informações relevantes sobre a seqüência cultural e espécies predominantes em cada tratamento durante o período de condução da área sob SPD são apresentadas no item Material e Métodos, no capítulo II.

Quadro 1. Espécies hibernais de cobertura do solo predominantes na área experimental, de acordo com o tratamento, nas safras agrícolas de 2008/2009 e 2009/2010. Eldorado do Sul, 2009.

Tratamento	Espécies
PD1	Aveia (<i>Avena sativa</i> L.), azevém (<i>Lolium multiflorum</i> L.), nabo (<i>Raphanus sativus</i> L.)
PD2	Aveia (<i>Avena sativa</i> L.), ervilhaca (<i>Vicia sativa</i> L.), azevém (<i>Lolium multiflorum</i> L.) e nabo (<i>Raphanus sativus</i> L.)
PD3	Azevém (<i>Lolium multiflorum</i> L.)
PD4	Aveia (<i>Avena sativa</i> L.), ervilhaca (<i>Vicia sativa</i> L.), azevém (<i>Lolium multiflorum</i> L.)
PD5	Aveia (<i>Avena sativa</i> L.), azevém (<i>Lolium multiflorum</i> L.)

6.2.2 Tratamentos

Os tratamentos principais deste estudo consistem de cinco sistemas de manejo das culturas: PD1 – rotação de culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e adubação com fertilizantes minerais; PD2 – sucessão de culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e adubação com fertilizantes minerais; PD3 – pousio, sem cultivo de inverno, ocorrendo apenas espécies vegetais de crescimento espontâneo e adubação com fertilizantes minerais; PD4 – sucessão de culturas de inverno, sem a realização da colheita das culturas no inverno, mantendo-se assim a totalidade da massa seca produzida para cobertura do solo e adubação com fertilizantes orgânicos; PD5 – rotação de culturas de inverno, com colheita de sementes, incorrendo em retirada de parte da fitomassa seca produzida no inverno e adubação com fertilizantes orgânicos (cama de aviário).

Nas avaliações relacionadas às culturas, tanto de inverno quanto de verão, as plantas localizadas a menos de 0,5 m a partir das extremidades das unidades experimentais não foram consideradas para fins de amostragem. Essas regiões se constituíram em bordaduras.

6.2.3 Fitomassa verde e seca da parte aérea das culturas de cobertura do solo de inverno

A determinação da quantidade de fitomassa seca produzida durante o inverno de 2008, antecedendo a implantação da cultura do milho, pelas coberturas por unidade de área, para cada tratamento principal, foi realizada antes da dessecação das mesmas, no período de máximo desenvolvimento vegetativo (florescimento).

Para as plantas que antecederam a cultura da soja, na safra 2009-2010, foi determinada, além da fitomassa seca, a fitomassa verde das plantas de cobertura do solo, obtendo-se a evolução da quantidade de fitomassa produzida. Para a fitomassa seca, os procedimentos amostrais foram os

mesmos do ano anterior. A fitomassa verde foi determinada nas datas de 13 de Agosto de 2009 (68 DAS – dias após a semeadura das culturas de inverno) e no florescimento, em 25 de setembro de 2009 (111 DAS).

As amostras foram compostas por todas as plantas contidas no interior de um retângulo medindo 0,6 x 0,4 m (0,24 m²), as quais foram cortadas junto ao solo, com o auxílio de uma tesoura de tosquia. Foram coletadas três amostras por tratamento principal. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 65° C até peso constante, sendo os valores assim obtidos extrapolados para Mg ha⁻¹. A determinação da fitomassa verde foi realizada logo após a amostragem.

6.2.4 Produtividade das culturas de verão

A estimativa da produtividade de grãos de milho (safra 2008/2009) e soja (safra 2009/2010) foi realizada através da coleta de amostras em quatro distintas condições de tráfego de rodados do trator e profundidade de atuação da haste sulcadora da adubadora-semeadora, considerados os tratamentos secundários, dentro de cada tratamento principal. Os tratamentos secundários se distinguem pela condição de tráfego de rodado dos pneus do trator e pela profundidade de atuação da haste sulcadora da adubadora-semeadora: CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora. As amostras foram constituídas das plantas obtidas da colheita de três linhas com quinze metros para cada tratamento secundário. Posteriormente, as amostras foram trilhadas mecanicamente através de uma trilhadora estacionária, e os grãos pesados. O teor de água dos grãos no momento da pesagem foi determinado, propiciando a correção de sua massa para a umidade de referência de 13% a base seca. Por fim, os resultados de cada tratamento foram convertidos para Mg ha⁻¹.

6.2.5 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos no período de estudo foram obtidos de uma estação meteorológica automática de marca Campbell, localizada na EEA-UFRGS. Os dados coletados foram a radiação solar global, por meio de um actinógrafo, as temperaturas máxima, mínima e média do ar em um abrigo meteorológico, a umidade relativa do ar com auxílio de um psicrômetro, a precipitação pluviométrica por meio de um pluviômetro e a velocidade do vento medida a 2 m da superfície do solo com um anemômetro totalizador. A partir destes elementos estimou-se a evapotranspiração de referência pelo método de Penman.

6.2.6 Análise estatística

Para a análise estatística dos dados de produção de fitomassa verde e seca pelas culturas de cobertura do solo no inverno, realizou-se a análise de variância (ANOVA) segundo o delineamento experimental inteiramente casualizado, com fator único. Quando a ANOVA indicou a ocorrência de interações significativas (teste F, $p < 0,05$), as médias dos tratamentos principais foram comparadas entre si, através do teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

Para a análise estatística dos dados de produção das culturas de verão, realizou-se a análise de variância (ANOVA) segundo o delineamento experimental inteiramente casualizado, mediante o emprego do modelo bifatorial (5 tratamentos principais X 4 tratamentos secundários) com três repetições. Os tratamentos principais, distribuído nas parcelas, corresponderam aos manejos das plantas de coberturas de inverno e adubação, enquanto que os tratamentos secundários, dispostos dentro das parcelas, foram constituídos pelas condições de tráfego e profundidade de atuação das hastes sulcadoras. Quando a ANOVA indicou a ocorrência de interações significativas (teste F, $p < 0,05$), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro do outro, através do teste Tukey com 5% de probabilidade de erro. A ANOVA e os testes de comparação entre médias pelo teste Tukey, foram realizados com o auxílio do programa computacional SAS

(SAS Institute, 2002).

6.3 Resultados e Discussão

O período transcorrido entre a semeadura da cultura do milho (02/12/2008) até sua colheita (17/04/2009) apresentou distribuição da precipitação, evapotranspiração e temperatura média do ar relativamente uniforme (Figura 19).

A distribuição das chuvas durante o período de desenvolvimento do milho apresentou maior número de eventos pluviométrico no estágio inicial de desenvolvimento da cultura, se estendendo até estágios posteriores à floração, que cessou por volta dos 90 dias após a semeadura, o que se deu por volta do final do mês de Fevereiro. De acordo com Carvalho et al. (2006) deficiências hídricas no estágio de desenvolvimento inicial das plantas pode promover reflexos na produção final, uma vez que esta é a fase em que a cultura ainda não apresenta seu sistema radicular totalmente desenvolvido e está mais suscetível a competição por água e nutrientes. Da mesma forma Magalhães & Durães (2006) e Brito et al. (2008) citam que as fases de germinação e de floração-formação de espigas, são os momentos em que a cultura do milho necessita de mais água para expressar seu potencial produtivo. Bergamaschi et al. (2004) também citam como momentos críticos em relação a demanda de água a etapa fenológica que vai desde a pré-floração ao início do enchimento de grãos, quando o milho é muito sensível ao déficit hídrico, em função da elevada transpiração que ocorre nesse período, em razão do maior índice de área foliar. Quando o déficit hídrico ocorre durante o período crítico da cultura, a produtividade de grãos é afetada, reduzindo, principalmente, o número de grãos por espiga (Matzenauer, 1994; Bergonci et al., 2001).

Após o início da floração, a partir do qual a planta passa do estágio vegetativo para o reprodutivo e, conseqüentemente, para a etapa de maturação, as chuvas ocorridas foram em menor quantidade. Próximo ao estágio de maturação fisiológica os eventos pluviométricos foram praticamente nulos, o que facilitou a perda de água pelos grãos e possibilitou a realização da colheita no momento ideal.

A demanda por água durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho depende dos fatores climáticos predominantes na região, do tipo de solo, da variedade e do estágio de desenvolvimento da cultura (Araújo et al., 1999). No Estado do Rio Grande do Sul, Bergamaschi et al. (2001) observaram que em lavouras com aproximadamente 67 mil plantas por hectare, um híbrido precoce de milho necessita de aproximadamente 650 mm de água em todo o seu ciclo de desenvolvimento, enquanto que Matzenauer et al. (2002) obtiveram uma demanda de aproximadamente 570 mm para o ciclo do milho. Durante a safra 2008/2009 no município de Eldorado do Sul, local do experimento, a quantidade de chuva ocorrida durante a condução da cultura do milho foi de 540 mm, evidenciando que houve disponibilização de água, pela chuva, em quantidade inferior à demanda necessária ao bom desenvolvimento da cultura. No entanto, as plantas podem ativar certos mecanismos fisiológicos que permitem aos vegetais tolerar essas limitações climáticas, como modificações no comportamento e frequência estomática, ajuste osmótico, aumento de espessura e cerosidade na cutícula foliar, entre outros em função das restrições causadas pela baixa disponibilidade de água do solo ou pela alta demanda evaporativa, modificando seu crescimento e desenvolvimento, e até mesmo atenuando as reduções na produção final (Magalhães & Durães, 2006).

A demanda hídrica pelas plantas de milho pode ser obtida pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo coeficiente de cultivo (K_c). De acordo com Matzenauer et al. (1989) os valores dos coeficientes da cultura (K_c) para o milho são de 0,40; 0,54; 0,93; 1,05; 0,78, respectivamente, para os períodos de semeadura-emergência, emergência-pendoamento, pendoamento-maturação leitosa, maturação leitosa-maturação fisiológica.

De acordo com Bergamaschi et al. (2001) a cultura do milho necessita em torno de 7 mm por dia de água durante o florescimento, quando este ocorre próximo ao solstício de verão, que é o período de máxima radiação solar. Nesta etapa fenológica a importância da água é evidenciada por Magalhães & Durães (2006) quando citam que dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, enquanto que se o estresse perdurar de quatro a oito dias, a diminuição pode chegar aos 50%. Nesse sentido a literatura (Caseiro et al., 1997; Matzenauer et al., 2002)

apresenta valores de demanda por água para o milho variando de aproximadamente 5 a 7 mm dia⁻¹, podendo chegar a valores extremos de 11 mm dia⁻¹ após a antese da cultura (Radin et al., 2000).

Durante o desenvolvimento do milho na área experimental, os eventos pluviométricos com maior quantidade de chuva aconteceram até mesmo após a floração do milho e provavelmente não tenha ocorrido deficiência hídrica nesse período, uma vez que a evapotranspiração potencial diária, calculada pelo método de Penman, durante o desenvolvimento da cultura do milho variou de 0,5 a 7,6 mm, com uma média para todo o ciclo de 4,6 mm diários, um pouco abaixo da média de 7,0 mm/dia.

A temperatura média do ar, assim como a temperatura do solo é importante para o crescimento e desenvolvimento da cultura e podem trazer limitações à produtividade. Temperaturas do solo inferiores a 10 °C e superiores a 40 °C podem promover uma série de prejuízos, como o aumento de dias para a germinação das sementes, no caso de baixas temperaturas, e prejuízos no rendimento, polinização e composição protéica dos grãos, quando ocorrem altas temperaturas do ar (Fancelli & Dourado Neto, 2000). Os mesmos autores citam que a temperatura ideal para germinação das sementes seria entre 25 e 30 °C. No entanto, as condições ótimas de temperatura variam com os diferentes estádios de crescimento e desenvolvimento das plantas (Cruz et al., 2006). De acordo com esses autores, a temperatura ideal para o desenvolvimento do milho, da emergência à floração, está compreendida entre 24 e 30 °C. Durante a condução da cultura do milho na safra agrícola de 2008/2009 a temperatura média do ar permaneceu em torno de 23 °C, muito próximo do que a literatura cita como ideal. Assim, pressupõe-se que não tenham ocorrido problemas no desenvolvimento da cultura relacionados a temperaturas extremas.

Da mesma forma que para a cultura do milho a precipitação, evapotranspiração potencial e temperatura média do ar durante o período de desenvolvimento da soja, desde a semeadura da cultura (09/12/2009) até sua colheita (30/04/2010) podem ser consideradas como relativamente bem distribuídas e em níveis que não causam grandes estresses fisiológicos para a cultura (Figura 20).

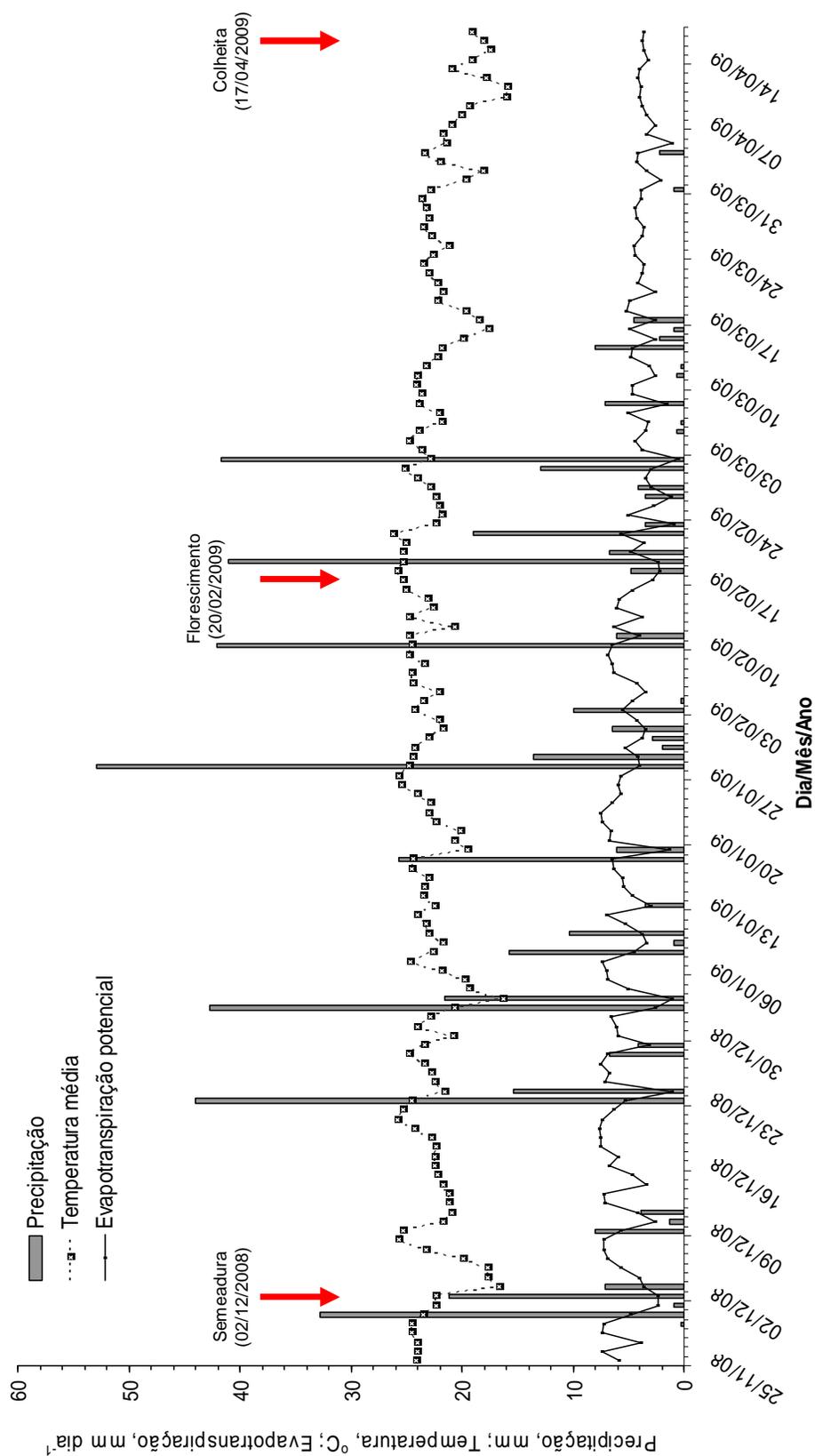


Figura 19. Precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração potencial referentes ao período de desenvolvimento da cultura do milho, na safra 2008/2009. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS.

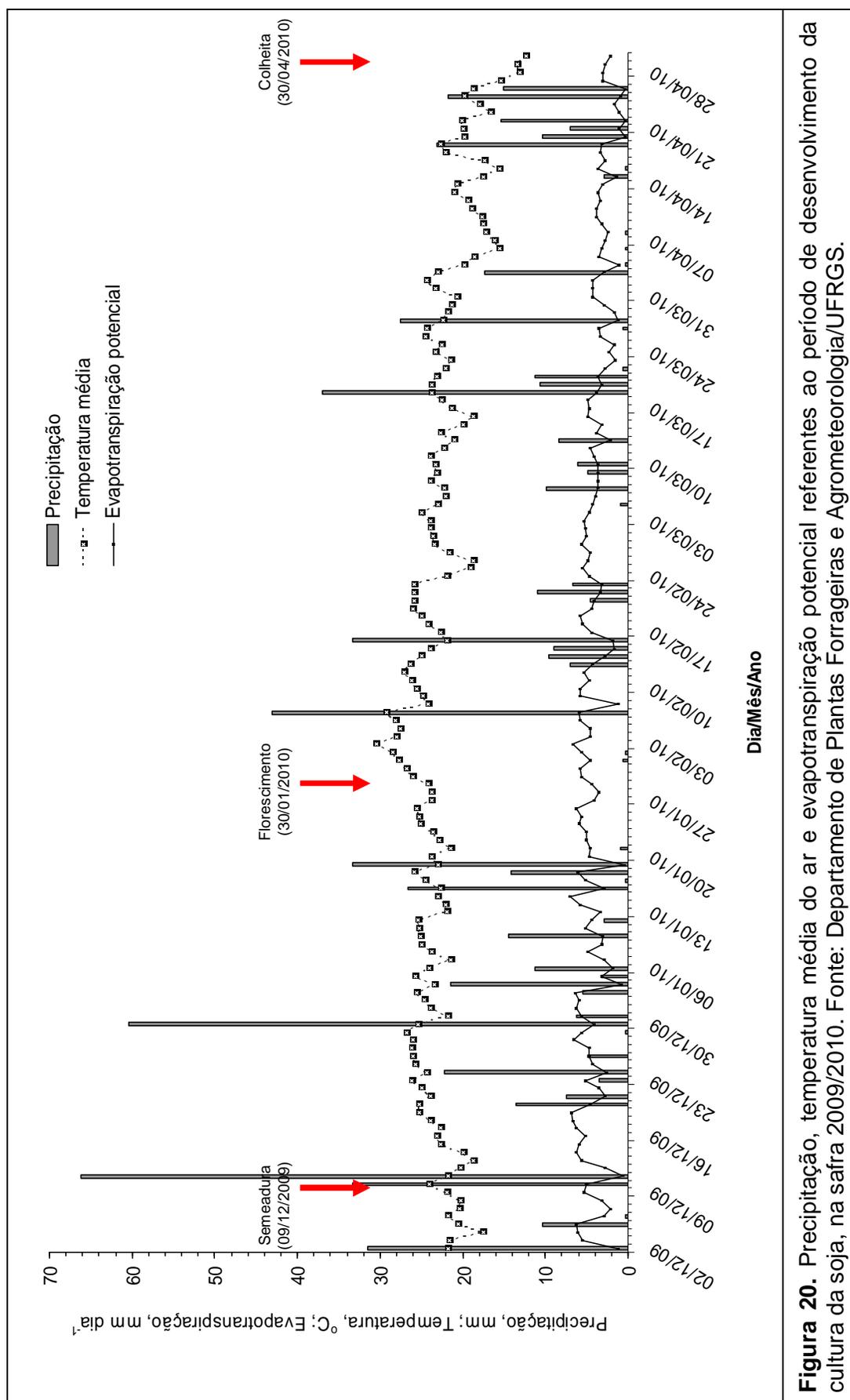


Figura 20. Precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração potencial referentes ao período de desenvolvimento da cultura da soja, na safra 2009/2010. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS.

Durante o desenvolvimento da soja, os eventos pluviométricos foram bem distribuídos, ocorrendo mais de 20 chuvas com precipitação diária acumulada superior a 10 mm. Nos estádios iniciais da cultura ocorrem as precipitações com maior volume, onde foram registrados eventos com precipitação próxima a 60 mm. Embora tenha se observado um grande número de chuvas, Matzenauer et al. (1998) citam que no Rio Grande do Sul deficiência hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da soja ocorre com frequência, sendo esse um dos principais fatores limitantes à obtenção de elevados rendimentos de grãos (Mota et al., 1996; Cunha et al., 1998). Mota et al. (1996) citam ainda a necessidade de irrigação da cultura da soja em qualquer época de semeadura recomendada, em todas as regiões climáticas do Estado. Matzenauer et al. (2003) citam que quando a soja é semeada em Dezembro ocorre menor risco de deficiência hídrica para a cultura da soja.

A precipitação total acumulada durante o ciclo da soja foi de aproximadamente 750 mm. Para o Rio Grande do Sul Berlato et al. (1986) obtiveram valores de demanda de água pela soja próximos a 830 mm para todo o ciclo, quantidade superior à precipitada na safra 2009/2010. No entanto, a demanda de água pela cultura da soja, depende da época de semeadura e das condições locais, podendo variar de 300 a 850 mm (Embrapa, 1994; Farias et al., 2001).

A evapotranspiração potencial referente ao período de desenvolvimento da soja no ano agrícola de 2009/2010 variou de $0,3 \text{ mm dia}^{-1}$ a $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$, sendo, de modo geral, maior nas etapas de desenvolvimento inicial da soja e diminuindo gradativamente até a colheita. A evapotranspiração potencial média foi de $3,9 \text{ mm dia}^{-1}$ para todo o ciclo.

De acordo com Matzenauer et al. (2003) a evapotranspiração potencial é usada para calcular a evapotranspiração máxima multiplicando-a pelo coeficiente de cultura. A evapotranspiração máxima, por sua vez, serve como indicativo da demanda de água pela planta. Para as características climáticas das principais regiões produtoras de soja no Brasil, os coeficientes de cultura da soja podem variar de aproximadamente 0,2 a 1,6 (Berlato et al., 1986; Farias et al., 2001; Mendes, 2006) dependendo do estágio de desenvolvimento. No entanto, geralmente são maiores nos estádio reprodutivos da planta.

Para o Rio Grande do Sul, Berlato et al. (1986) obtiveram valores médios de evapotranspiração máxima em torno de 6 mm dia^{-1} , sendo a demanda de água pela cultura menor nas fases iniciais de desenvolvimento e maior no início de enchimento de grãos. Percebe-se assim, que não ocorreu período prolongado de manutenção das plantas sob estresse hídrico.

De acordo com Farias et al. (2001) os dois períodos críticos com relação à falta de água na soja são da semeadura à emergência e no enchimento dos grãos. Durante a germinação, tanto o excesso como a falta de água é prejudicial ao estabelecimento da cultura. No entanto, vários estudos comprovam que o período reprodutivo da soja é o mais sensível ao déficit hídrico.

O início do florescimento da cultura da soja se deu ao final do mês de janeiro de 2010, quando a cultura passou por um período de aproximadamente 18 dias sem a ocorrência de precipitações expressivas. Esse fato pode ter contribuído para a ocorrência de estresse hídrico nas plantas. De acordo com Embrapa (1999) a ocorrência de déficits hídricos expressivos durante esse estágio pode provocar alterações fisiológicas na planta, causando a queda prematura de folhas e flores, abortamento de vagens e redução na produtividade de grãos, uma vez que nesse período quase metade dos nutrientes necessários ao enchimento de grãos provém do solo e da fixação biológica de nitrogênio (Neumaier et al., 2000) que não ocorrem na ausência de água.

A temperatura média do ar referente ao período de desenvolvimento da cultura da soja, na safra agrícola de 2009/2010, variou de $13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. O comportamento da temperatura média do ar foi polinomial, com temperaturas menores no início de desenvolvimento da cultura, aumentando até os 57 dias após a semeadura e decrescendo, posteriormente. A maior temperatura média do ar foi registrada no dia 03 de fevereiro de 2010, próximo ao período da floração. Para todo o ciclo da cultura a média das temperaturas foi de $22,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedyama (2009) relata que a indução floral é ótima quando a temperatura do ar encontra-se entre 20° e 30°C , sendo que a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento está em torno de 30°C (Embrapa, 2002).

Outrossim, quando as temperaturas forem menores ou iguais a $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ o crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo e com temperaturas

acima de 40 °C há efeito adverso na taxa de crescimento, podendo provocar distúrbios na floração e diminuição da capacidade de retenção de vagens. Quando essas temperaturas ocorrem simultaneamente à ocorrência de déficits hídricos, se acentuam os problemas (Embrapa, 2002).

6.3.1 Fitomassa verde e seca da parte aérea das culturas de cobertura do solo de inverno

Para a complementação da discussão dos resultados do presente estudo são utilizados resultados dos atributos químicos, físico-mecânicos e mineralógicos do solo referenciados nos capítulos II, III e IV.

Os dados de fitomassa seca da parte aérea produzida pelas plantas de cobertura do solo implantadas no inverno, no ano de 2008, demonstram que em todos os tratamentos houve razoável produção de fitomassa e que as espécies utilizadas apresentaram resposta diferenciada da massa seca da parte aérea em relação aos manejos do solo impostos. De modo geral, observando-se a média dos tratamentos, percebe-se que foram aportados ao solo aproximadamente 4,0 Mg de fitomassa por hectare por meio da parte aérea das plantas de cobertura, sem considerar o aporte de massa pelas raízes das plantas.

Tabela 18. Fitomassa seca da parte aérea produzida pelas plantas de cobertura do solo implantadas no inverno. Eldorado do Sul - 2008.

Tratamento	Fitomassa seca
	----- Kg ha ⁻¹ -----
PD1	4.032,6 ab
PD2	4.448,5 a
PD3	4.192,1 ab
PD4	3.268,1 b
PD5	3.960,6 ab
Média	3.980,4

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV = 9,8%. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – Rotação de culturas + adubação orgânica.

A produção de fitomassa seca pelas raízes auxilia na incorporação de C ao solo (Redin, 2010), promove melhorias na agregação do solo, principalmente na camada superficial (Garcia & Rosolem, 2010) e pode atenuar os problemas de compactação do solo (Sodré Filho et al., 2004), criando poros que servirão como rotas por onde as raízes da cultura subsequente possam crescer (Silva & Rosolem, 2001) entre outros benefícios.

De acordo com Ceretta et al. (2002), para que o SPD tenha sucesso há a necessidade de manutenção de sistemas capazes de gerar quantidades de fitomassa suficientes para manter o solo coberto durante todo o ano, de modo que áreas destinadas à produção de grãos na primavera-verão não devem permanecer em pousio durante o inverno.

Segundo Kluthcouski (1998) e Menezes (2002) uma quantidade de 5 a 6 Mg ha⁻¹ de massa seca (MS) sobre o solo é considerada adequada no SPD, no Brasil, proporcionando uma boa taxa de cobertura de solo. Denardin & Kochhann (1993), da mesma forma, propõem adição anual de 6 Mg ha⁻¹ de palha na superfície para que o sistema de plantio direto possa manifestar o seu potencial. Bayer (1996), no entanto, sugerem um aporte anual de palha de 10 a 12 Mg ha⁻¹. Para o autor, essa quantidade de palha pode ser obtida em sistemas de produção com a utilização de culturas de cobertura e rotação de culturas, e culturas como a soja, devido à pequena quantidade de palha produzida (2,5 Mg ha⁻¹ano), necessita ser precedida por cultura com elevado potencial de produção de palha. Por outro lado, para a manutenção dos estoques iniciais de carbono no solo, com taxa de adição similar à taxa de decomposição, Lovato et al. (2004) estimam que em áreas de plantio direto no sul do Brasil há a necessidade de adição anual de aproximadamente 4,2 Mg ha⁻¹ de carbono. Na área de estudo esses valores foram obtidos somente com a utilização de plantas hibernais de cobertura.

O tratamento no qual houve maior aporte de fitomassa foi o PD2, composto por sucessão de culturas adubadas com fertilizante químico, onde predominava uma maior diversidade botânica, principalmente com as espécies de azevém (*Lolium multiflorum* L.), aveia (*Avena sativa* L.), ervilhaca (*Vicia sativa* L.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). Neste tratamento houve produção de fitomassa na ordem de 4.448,5 kg ha⁻¹, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Para as mesmas culturas, submetidas, no entanto, à

adubação orgânica, a produção de fitomassa da parte aérea foi de apenas 3.268,1 kg ha⁻¹, sendo o tratamento com menor produção de fitomassa aérea. Percebe-se, portanto, que houve uma interação entre os sistemas de manejo das culturas e do manejo da adubação na produção de fitomassa seca aérea das culturas de cobertura do solo, evidenciando que o tipo de fertilizante afeta a produção de fitomassa, principalmente quando há a presença de uma maior diversidade de espécies presentes. Os mesmos resultados não se evidenciaram na comparação dos diferentes adubos quando na área o manejo é realizado com rotação das culturas.

Diferentemente do proposto por Ceretta et al. (2002), sistemas de manejo das plantas de cobertura podem utilizar o pousio na estação invernal, desde que haja um banco de sementes com elevado potencial de desenvolvimento de plantas espontâneas. Neste estudo, por exemplo, o tratamento com pousio produziu quantidade superior a 4 Mg de fitomassa seca da parte aérea, não diferindo dos demais tratamentos.

Há de se lembrar, no entanto, que a produção de fitomassa aérea e radicular das plantas de cobertura do solo varia a cada ciclo produtivo. Silva & Rosolem (2001) citam que o crescimento, desenvolvimento e adaptabilidade das culturas de cobertura nos sistemas de produção dependem das condições de clima de cada região. Da mesma forma, Amado et al. (2002) acrescentam que a produção de fitomassa das espécies utilizadas como cobertura é decorrente das condições edáficas, fitossanitárias e principalmente do seu sistema radicular. Para o ano agrícola de 2009, a produção de fitomassa apresentou cenário diferente do ano anterior (Tabela 19). Neste ano agrícola, a fitomassa seca da parte aérea, no momento de máximo desenvolvimento vegetativo, foi de aproximadamente 6.700 kg ha⁻¹, para os tratamentos PD1 e PD4. Estes foram os tratamentos com maior produção de fitomassa seca da parte aérea, diferindo estatisticamente do tratamento com pousio. Essa produção se enquadra dentro dos limites propostos por Kluthcouski (1998), Menezes (2002) e Denardin & Kochhann (1993) somente com o cultivo de plantas hibernais de cobertura do solo. Aqui, mais uma vez, é perceptível a interação entre o manejo das plantas de cobertura e o manejo da adubação, uma vez que diferentes respostas foram obtidas quando se usa adubação química ou orgânica aliada a sistemas de rotação ou sucessão de culturas de

cobertura. Neste mesmo ano, a menor produção de fitomassa seca da parte aérea foi obtida no sistema de manejo das plantas de cobertura onde se utiliza o pousio invernal. A produção neste tratamento foi inferior ao ano anterior e menor que 4 Mg ha^{-1} , sendo que a implantação de culturas via, sucessão e/ou rotação seria necessária.

Para que as plantas de cobertura do solo possam produzir suficiente fitomassa aérea e proteger o solo contra erosão e perda de nutrientes, a velocidade de estabelecimento e desenvolvimento são de extrema importância, uma vez que a pressão de competição entre as plantas cultivadas e as plantas espontâneas pode ser pronunciada, por causa da diversidade de espécies de invasoras e da ausência de uma cultura que estabeleça condições de sombreamento do solo, dificultando o desenvolvimento das plantas cultivadas e, conseqüentemente, sua produção de fitomassa. Ainda, de acordo com Alvarenga et al. (1995), o manejo mais recomendado para a proteção e conservação do solo é a manutenção da superfície do solo permanentemente coberta por materiais vegetais em fase vegetativa ou como resíduo.

Houve uma acentuada relação do desenvolvimento inicial das plantas de cobertura com o desenvolvimento e produção final de fitomassa da parte aérea (Tabela 19). Aos 68 dias após a semeadura das culturas, o tratamento PD4 foi o que apresentou maior produção absoluta de fitomassa verde em comparação com os demais tratamentos, embora não apresente diferença estatisticamente significativa.

Da mesma forma que para a fitomassa verde, para a fitomassa seca aos 68 dias após a semeadura, o tratamento com maior produção absoluta, embora sem apresentar diferença estatisticamente significativa, foi o PD4, composto por sucessão de culturas e adubação orgânica. A produção de fitomassa verde aos 68 dias após a semeadura, neste estudo, variou de 9.150 no tratamento PD5 a $15.228 \text{ kg ha}^{-1}$ no tratamento PD4. Já a produção de fitomassa seca, na mesma data de avaliação, variou de 1.615 para o sistema PD1 a 2.625 kg ha^{-1} no tratamento PD4. Quando se comparam os dados de produção de fitomassa seca aos 68 DAS para os tratamentos com sucessão e os com rotação de culturas, percebeu-se que na presença de culturas consorciadas há uma maior produção de fitomassa seca. Esses dados confirmam os pressupostos de Heinrichs et al. (2001), que citam que as

principais vantagens do cultivo consorciado, apresentado no tratamento PD4, em relação ao cultivo isolado, são a obtenção de maior rendimento de matéria seca e maior acúmulo de nutrientes. Além disso, segundo os mesmos autores, a água e os nutrientes do solo podem ser mais eficientemente utilizados pela exploração de diferentes volumes de solo por sistemas radiculares distintos, além do fato de que a presença de gramíneas junto com leguminosas adiciona ao solo uma fitomassa com relação C/N intermediária àquelas das culturas isoladas.

Tabela 19. Fitomassa verde e seca produzida aos 68 e 111 dias após a semeadura (DAS) pelas plantas hibernais de cobertura do solo implantadas no inverno. Eldorado do Sul - 2009

Tratamento	68 DAS		111 DAS	
	Verde	Seca	Verde	Seca
----- kg ha ⁻¹ -----				
PD1	12.027,9 ^{ns}	1.615,1 ^{ns}	44.306,3 a	6.774,0 a
PD2	10.870,0	1.788,3	29.988,8 ab	5.085,8 ab
PD3	9.911,1	1.870,0	13.084,0 b	3.145,4 b
PD4	15.228,3	2.625,0	37.862,8 ab	6.760,7 a
PD5	9.150,8	1.789,9	15.042,6 b	4.410,0 ab
Média	11.437,6	1.937,7	28.056,9	5.235,2
CV (%)	22,04	24,85	32,91	19,93

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – rotação de culturas + adubação orgânica. ^{ns} - Não significativo

Os dados de fitomassa seca produzida aos 111 DAS evidenciam o grande potencial produtivo de fitomassa da parte aérea das plantas de cobertura de solo de inverno utilizadas em sistemas de rotação e sucessão de culturas em SPD. As produções de fitomassa dessas culturas foram similares às encontradas por Suhre et al. (2004), em experimento também realizado na EEA/UFRGS, onde, para o consórcio aveia preta + ervilhaca e para o nabo forrageiro, a produção foi de, respectivamente, de 3,1 e 5,9 Mg ha⁻¹.

A produtividade das culturas (Tabela 20) foi avaliada pelo rendimento de grãos de milho (safra 2008/09) e de soja (safra 2009/10). O rendimento dos grãos de milho foi relativamente alto, com a produtividade variando de 5.969 kg ha⁻¹ na condição de manejo das plantas sob rotação de

culturas associada a adubação com fertilizantes químicos minerais, e com as hastes sulcadoras atuando em maior profundidade em áreas não trafegadas, e até 10.707 kg ha⁻¹ para a condição de sucessão de culturas associada a adubação orgânica em locais onde ocorre o tráfego de rodados e as hastes sulcadoras da semeadora adubadora atuam em maior profundidade. Isso representa uma variação de aproximadamente 100 sacas por hectare para quase 180 sacas por hectare. Neste sentido, a escolha correta do manejo imposto ao solo pode representar um aumento de aproximadamente 80% na produtividade do milho. Nota-se, neste sentido, que a dinâmica da produção é dependente da sinergia entre os sistemas de manejo das plantas de cobertura e dos parâmetros mecânicos envolvidos no manejo do solo.

Quando os sistemas de manejo das plantas hibernais de cobertura e da adubação são comparados entre si, independentemente da condição de tráfego e profundidade de atuação das hastes sulcadoras, a maior produtividade média de milho foi obtida na área com pousio invernal e adubação mineral das culturas de verão. Ressalta-se que, nesse sistema, é necessária adição de fitomassa (Tabela 18) pelas culturas de verão para promover boas condições químicas (Cap. II) e físicas (Cap. III) no solo e obtenção de elevadas produtividades das culturas de verão.

Em contrapartida, o sistema de manejo que promoveu a menor produtividade foi o que utiliza adubação orgânica associada à rotação de culturas. Para todos os sistemas onde se maneja o solo sob SPD a produção de milho foi inferior à área sob pousio invernal. Esperava-se, para as áreas sob SPD, que os índices de produtividade fossem superiores à área sob pousio, uma vez que sob SPD ocorrem melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. O comportamento da produtividade pode ser explicado pela ausência de diferenças nos principais atributos físicos do solo, pela similar produção de fitomassa na área sob SPD, comparada ao CN e, pelo desequilíbrio de nutrientes em SPD.

Calegari (1998) cita que, de modo geral, em SPD há maior disponibilidade de água, em função da redução da evaporação e controle da temperatura ocasionada pela proteção física da superfície do solo com palha, maior disponibilidade de nutrientes, maior teor de matéria orgânica e, melhores condições de aeração do solo, fundamental para atender à maior demanda

respiratória de plantas e melhores condições biológicas do solo. Este mesmo autor afirma que podem ter ocorrido falhas em alguma fase ou componente do sistema se a produtividade das culturas sob SPD não aumentar. Mesmo assim, produções superiores a 8.000 kg ha⁻¹ são quase 100% maiores que a produtividade média nacional, que nos anos agrícolas de 2009/2010 e 2010/2011, giraram em torno de 4.300 kg ha⁻¹ (CONAB, 2011).

Para os sistemas de manejo das plantas de cobertura, portanto, somente foram observadas diferenças estatísticas significativas entre a área com pousio e a área com rotação de culturas associada a adubação orgânica. Os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário. A ausência de resposta dos sistemas de manejo das culturas hibernais pode estar relacionada ao estado de elevada fertilidade do solo na maior parte dos tratamentos.

Tabela 20. Produtividade (kg ha⁻¹) da cultura do milho em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Safra 2008/2009. Eldorado do Sul – 2009.

Condição	Sistema de manejo					Média
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
CTP	10.420aA	8.317aA	10.540aA	10.707aA	9.067aA	9.810a
STP	5.969bA	8.034aA	9.739aA	8.576aA	7.551aA	7.974b
STR	7.285abA	9.809aA	9.030aA	8.749aA	7.274aA	8.429ab
CTR	10.264abA	9.352aA	10.457aA	9.674aA	8.176aA	9.584a
Média	8.484AB	8.878AB	9.941A	9.426AB	8.017B	-

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. PD 1 – Rotação de culturas + adubação química; PD 2 – Sucessão de culturas + adubação química; PD 3 – Pousio; PD 4 – Sucessão de culturas + adubação orgânica, PD 5 – rotação de culturas + adubação orgânica. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

Do mesmo modo, os efeitos do tráfego dos rodados do trator e a profundidade de atuação das hastes sulcadoras também influenciaram a produtividade da cultura do milho, uma vez que houve diferença significativa entre a profundidade de atuação das hastes sulcadoras e do tráfego de

rodados. Na média geral dos tratamentos, na área onde não ocorre tráfego e as hastes sulcadoras atuam em maior profundidade a produtividade do milho foi de 7.974 kg ha⁻¹, variando para 9.810 kg ha⁻¹ na condição de tráfego de rodados na área e hastes sulcadoras atuando em maior profundidade.

Com relação ao tráfego, a produtividade da cultura do milho foi superior nas áreas com tráfego do rodado em relação às áreas não trafegadas. O maior efeito em relação ao tráfego se deu na área com rotação de culturas e adubação mineral (PD1). Em relação à profundidade de atuação das hastes não há evidências de superioridade na produtividade da cultura quando se compara a atuação profunda com a rasa, uma vez que ela vai depender do manejo das culturas de cobertura, da forma de adubação utilizada e de presença ou ausência de tráfego.

Embora a compactação do solo seja muitas vezes associada à perdas na produtividade das culturas devido às modificações físicas no ambiente radicular, ocasionando a redução da disponibilidade de oxigênio e água e o aumento da resistência do solo ao crescimento radicular (Reichert et al., 2003; Cavalieri et al., 2006; Rosa, 2007), dependendo da intensidade de compactação, podem ocorrer melhorias no solo e produtividade de culturas em função da dinâmica da água em solos sob tráfego de rodados (Caires & Fonseca, 2000). Provavelmente a pressão do pneu sobre o solo propiciou melhores condições físicas à emergência e estabelecimento das plantas e, por consequência, produtividade da cultura nas áreas trafegadas.

A análise dos dados de produtividade de soja (Tabela 21) evidenciou interação significativa entre os sistemas de manejo das plantas de cobertura associado ao manejo da adubação com a profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo e condição de tráfego dos rodados na área.

A produtividade da soja variou de 2.766 kg ha⁻¹ quando a soja foi cultivada sob rotação de culturas e aplicação de fertilizantes orgânicos (PD5) em área sem tráfego de rodados do trator e hastes sulcadoras da semeadora atuando em menor profundidade (STR) para 4.540 kg ha⁻¹, onde ocorre o mesmo manejo das plantas de cobertura e manejo da adubação, contudo, em área onde ocorre tráfego de rodados e as hastes sulcadoras atuam em maior profundidade. Essa variação pode representar um aumento de aproximadamente 65% com relação à escolha do manejo da lavoura mais

adequado. Em vista disso, nota-se também para a soja, que a dinâmica da produção é dependente da sinergia entre os sistemas de manejo das plantas de cobertura, da adubação e dos parâmetros mecânicos envolvidos no manejo do solo.

Independentemente do sistema de manejo adotado, para um ano com boa distribuição da precipitação, a produtividade da soja foi considerada alta, superando, inclusive, a média nacional, que nos anos agrícolas de 2009/2010 e 2010/2011, se apresentou em torno de 2.900 kg ha⁻¹ (CONAB, 2011).

Tabela 21. Produtividade (kg ha⁻¹) da cultura da soja em diferentes condições de tráfego e profundidade de trabalho das hastes sulcadoras para deposição de adubo em semeadura direta num Argissolo com diferentes manejos da adubação e das plantas hibernais de cobertura. Safra 2009/2010. Eldorado do Sul - 2010

Condição	Sistema de manejo					Média
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	
CTP	3.787abA	4.039aA	4.005aA	4.333aA	4.540aA	4.141a
STP	3.413abA	3.024bA	3.317aA	3.557abA	3.376bcA	3.337b
STR	3.254bA	3.028bA	3.166aA	3.379bA	2.766cA	3.119b
CTR	4.234aA	4.020aA	3.790aA	4.217abA	4.296abA	4.111a
Média	3.672A	3.528A	3.570A	3.872A	3.745A	-

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. CTR – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; CTP – área sob tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora; STR – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação rasa (0,10 m) do sulcador da semeadora; STP – área sem tráfego dos rodados do trator e atuação profunda (0,15 m) do sulcador da semeadora.

Quando, no entanto, os sistemas de manejo das plantas hibernais de cobertura e da adubação são comparados entre si, independentemente da condição de tráfego e profundidade de atuação das hastes sulcadoras, não ocorreu diferença estatística significativa entre os tratamentos. A ausência de resposta na produtividade da soja em função dos manejos provavelmente deve estar associada ao regime pluviométrico, que promoveu boa distribuição da chuva no período de desenvolvimento da cultura, da elevada fertilidade do solo em todos os tratamentos e das semelhantes condições físicas apresentadas nos distintos manejos. Debiasi (2008), por exemplo, em área próxima e com

tratamentos similares, em avaliação da safra agrícola 2005/2006, encontrou rendimento médio da soja de 1,75 Mg ha⁻¹. O autor cita que durante o período de desenvolvimento da cultura o déficit hídrico atingiu praticamente toda a fase reprodutiva dessa cultura, repercutindo negativamente sobre o rendimento da cultura. Entretanto, na safra posterior, o regime hídrico foi favorável ao desenvolvimento das culturas de verão tornando alto rendimento da soja, em média 3,54 Mg ha⁻¹, não encontrando diferenças significativas entre os tratamentos com cobertura do solo no inverno.

Assim, como os rendimentos não foram significativamente afetados pelo tipo de adubação e manejo das plantas de cobertura, pode-se considerar que tanto a adubação mineral, como a orgânica, bem como os sistemas de rotação e sucessão de culturas foram eficientes em determinar boas condições para o estabelecimento, crescimento e produção das culturas. Pauletti et al. (2003), avaliando o rendimento de grãos em diferentes sistemas de manejo e de culturas ao longo de oito anos, também não observaram diferenças significativas para o rendimento de grãos.

Do mesmo modo que para a cultura do milho, os efeitos do tráfego dos rodados do trator e a profundidade de atuação das hastes sulcadoras também influenciaram a produtividade da cultura da soja, uma vez que houve diferença significativa entre a profundidade de atuação das hastes sulcadoras e do tráfego de rodados. Na média geral dos tratamentos, a área onde não ocorreu tráfego e as hastes sulcadoras atuaram em menor profundidade, a produtividade da soja foi de 3.119 kg ha⁻¹, variando para 4.141 kg ha⁻¹ na condição de tráfego de rodados na área e hastes sulcadoras atuando em maior profundidade.

De modo geral, nota-se que, isoladamente, a profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora não afetou de forma significativa o rendimento da soja. Outros autores também citam resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho (Beutler, 2005; Debiasi, 2008; Sequinatto, 2010), mesmo em safras agrícolas que apresentaram déficit hídrico.

A ausência de diferenças significativas no rendimento de grãos da soja em virtude da profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora pode ser justificada, além da adequada disponibilidade hídrica, ao padrão de ruptura e mobilização do solo na linha de semeadura. Mesmo

atuando em maior profundidade, a área da seção transversal do sulco (Tabela 12) produzido pelas hastes sulcadoras para adubo foram semelhantes e não apresentaram diferença estatística significativa. Enquanto numa condição de profundidade o sulco produzido foi mais profundo, noutra o sulco produzido apresentou maior largura. Portanto, ambas as situações promoveram efeitos positivos sobre os parâmetros físico-hídrico-mecânicos, com diminuição das limitações físicas ao desenvolvimento radicular, principalmente da resistência mecânica à penetração de raízes no solo, proporcionando condições favoráveis ao estabelecimento das culturas.

De modo similar ao milho, com relação ao tráfego, a produtividade da cultura da soja foi superior nas áreas com tráfego do rodado em relação às áreas não trafegadas. Esses resultados dão suporte e podem confirmar as afirmações referentes às condições que propiciam maior produtividade em áreas trafegadas pelos rodados do trator.

6.4 Conclusões

1. Os distintos manejos das plantas hibernais de cobertura do solo, com produção de fitomassa em torno de 4 Mg ha^{-1} , comparados entre si, não produzem efeitos suficientes para promover acentuada diferenciação na produtividade das culturas.

2. Em virtude da produção irregular de fitomassa pelos sistemas de manejo no decorrer dos anos, a utilização do sistema de rotação de culturas em sistema plantio direto, com maior diversidade botânica, não aumentou a produtividade das culturas de verão quando comparadas a área com sucessão de culturas;

3. Embora os sistemas de manejo do solo que utilizam fertilizantes orgânicos aumentem os teores de matéria orgânica do solo e melhorem a fertilidade do solo, não ocorre um simultâneo efeito positivo na produtividade das culturas de verão em comparação com o uso de fertilizantes químicos;

4. Solo onde ocorreu o tráfego do rodado do trator com pressão de contato pneu-solo máxima de 120 KPa apresenta maior rendimento de grãos das culturas do milho e da soja, em relação ao solo não trafegado.

5. Independentemente da profundidade de atuação das hastes

sulcadoras nas semeadoras-adubadoras ocorre uma melhora no ambiente físico de crescimento radicular que permite a obtenção de elevados rendimentos das culturas do milho e da soja em anos de cultivo com adequada precipitação durante o ciclo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para as condições ambientais da região em estudo, a transição do uso do solo de campo natural para uma área produtora de grãos sob sistema plantio direto, com recorrente e continuado aporte de fertilizantes, orgânicos ou minerais e, manejo das plantas de cobertura com rotação ou sucessão de culturas, promove efeitos positivos sobre a evolução dos atributos químicos do solo. No entanto, esta melhoria, até 10 anos de condução do sistema, concentra-se na camada mais superficial do perfil do solo, incorrendo em acentuada estratificação química vertical no perfil.

Uma vez que o SPD é um sistema em constante evolução, muitos problemas inerentes, inclusive os relacionados à formação de um gradiente químico no solo, podem ser considerados limitantes transicionais da produtividade das culturas, uma vez que a camada subsuperficial do perfil pode a adquirir qualidade adequada ao desempenho de suas funções, frente a sustentabilidade da produção agrícola com o passar do tempo.

Todos os resultados apresentados neste trabalho têm um aspecto singular, uma vez que este é um dos poucos trabalhos de pesquisa que avaliaram a transição do uso do solo de campo nativo para área sob SPD sem passar por um período pretérito de degradação do solo. Para estas condições ambientais e de condução das lavouras que se estabeleceram no desenvolvimento deste estudo, a adoção e o uso continuado do SPD, por longo período de tempo, promovem boas condições estruturais ao solo. No entanto, não proporcionam estratificação vertical dos atributos físicos do solo. Provavelmente, a plasticidade não muito elevada e o tráfego de máquinas e implementos agrícolas sob condições não deletérias podem ter contribuído para a ausência de efeito dos sistemas de manejo sobre a ausência de

estratificação vertical no perfil do solo dos atributos físicos.

Os atributos mecânicos do solo avaliados neste estudo podem ser considerados indicadores sensíveis às mudanças no uso do solo, especialmente com relação aos elementos rompedores de solo utilizados na semeadura. As hastes sulcadoras das semeadoras-adubadoras associadas ao tráfego de rodados das máquinas promovem acentuadas alterações no ambiente solo e apresentam efeito superior aos atributos químicos, físicos e mineralógicos sobre o rendimento das culturas de milho e soja. Em anos com distribuição regular da precipitação pluviométrica, a utilização de hastes sulcadoras atuando em maior profundidade pode ser uma prática alternativa para a obtenção de distribuição mais homogênea dos fertilizantes químicos no perfil do solo, podendo atenuar os problemas relacionados à formação de gradiente físico-químico vertical no perfil em solos que adotam o SPD.

Frente a este cenário tornam-se necessários a implantação e condução de mais experimentos desta natureza, com monitoração anual dos dados, avaliação da transição do uso do solo em áreas de campo nativo que apresentem prévia degradação química, física e biológica e estudos em locais onde as áreas sob pousio sejam distintas das apresentadas neste experimento. Aliado a isso, a continuidade da avaliação deste experimento, principalmente por um período igual ou superior ao tempo necessário para esta área sob SPD atingir a fase de manutenção podem trazer novos caminhos a serem seguidos em estudos sobre o SPD.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEAS - Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. **Histórico, característica e benefícios do plantio direto**. Brasília, DF: ABEAS: Universidade de Brasília. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2005. 113 p. il. (ABEAS. Curso Plantio Direto. Módulo 1).

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 6 p.

_____. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3 p.

AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, R. S. D. (Coord.). **Atualização em recomendação de adubação e calagem**: ênfase em plantio direto. Santa Maria: Pallotti, 1997. p. 76-111.

AITA, C. et al. Plantas de cobertura de solo como fontes de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 157-165, 2001.

AGROCONSULT. **Estado da arte e divulgação do plantio direto em 2008**: rally da safra 2008. Florianópolis, 2008. 39 p. Relatório de projeto. Disponível em: <www.rallydasafra.com.br>. Acesso em: 05 jan. 2012.

AGROCONSULT. **Estado da arte e divulgação do plantio direto em 2010**: rally da safra 2010. Florianópolis, 2010. 47 p. Relatório de projeto. Disponível em: <www.rallydasafra.com.br>. Acesso em: 05 jan. 2012.

ALBUQUERQUE, J. A. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n. 3, p.799-806, 2003.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Atributos Físicos de Latossolos Ácricos do Norte Paulista. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 2, p. 321-326, 1994.

ALVARENGA, R. C. et al. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 2, p. 175-185, 1995.

AMADO, T. J. C. **O sistema plantio direto na palha de qualidade e os serviços ambientais**. 2009. Disponível em: <<http://www.agrisus.org.br/>>. Acesso em: 22 out. 2009.

AMADO, T. J. C.; et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de coberturas do solo, sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 241-248, 2002.

AMBROSANO, E. J. et al. **Plantas para cobertura do solo e adubação verde aplicadas ao plantio direto**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. 16 p. (Encarte técnico. Informações agronômicas, 112).

ANGHINONI, I. Adubação fosfatada e potássica em plantio direto. In: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. (Org.). **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava, PR: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p. 87-103.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873-928.

ANJOS, J. T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 139-145, 1994.

ARAÚJO, W. F.; SAMPAIO, R. A.; MEDEIROS, R. D. Irrigação e adubação nitrogenada em milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 909-914, 1999.

ASSIS, R. L. de et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.

BAGARELLO, V. et al. Field and laboratory approaches for determining sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 130, p. 1-13, 2006.

BAYER, C. Aumento do estoque de matéria orgânica de um Cambissolo Húmico catarinense sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 2, n. 1, p. 88-96, 2003.

_____. **Características químicas do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por métodos de preparo e sistemas de culturas.** 1992. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

_____. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas conservacionistas de manejo de Solos.** 1996. 241 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Húmico em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 537-544, 2003.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre: Gênese, 2008. p. 7-18.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 599-607, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 23-28, 1998.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; SANTOS, S. R. Física do solo, diagnóstico e manejo da compactação em plantio direto. In: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. (Org.). **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto.** Guarapuava, PR: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p. 161-188.

BAYER C.; SCHENEIDER, N. G. Plantio direto e o aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo em pequenas propriedades rurais no município de Teutônia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 165-166, 1999.

BALDOCK, J. A. et al. Aspects of the chemical structure of soil organic material as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy. **Biogeochemistry**, v. 16, p. 1-42, 1992.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach.** New York: Wiley-Interscience, 1984. 398 p.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de matéria orgânica. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 215-221, 1998.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set, 2004.

BERGAMASCHI, H. et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorologia**, Buenos Aires, v. 1, n. 1, p. 23-27, 2001.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R. **Agroclima da estação experimental agronômica**. Porto Alegre: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS, 1990. 91 p.

BERGONCI, J. I. et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001.

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque "classe A" e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1047-1054, 2000.

BERTOL, I. et al. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.3, p. 485-494, 2004a.

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

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

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para

a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BIGHAM, J. M.; FITZPATRICK, R. W.; SCHULZE, D. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 323-366. (Book Series, 7).

BISSANI, C. A. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2008. 344 p.

BIZARRO, M. J. **Inoculação de soja em solo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2004. 59 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BIZARRO, M. J. **Simbiose e variabilidade de estirpes de Bradyrhizobium associadas à cultura da soja em diferentes manejos do solo**. 2008. 97 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975-983, 2008.

BLAISE, D. et al. Effects of farmyard manure and fertilizers on yield, fibre quality and nutrient balance of rainfed cotton (*Gossypium hirsutum*). **Bioresource Technology**, New York, n. 96, p. 345-349, 2005.

BORGES FILHO, E. L. **O desenvolvimento do plantio direto no Brasil: a conjugação de interesses entre agricultores, indústria e o Estado**. 2001. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BORGES FILHO, E. L. Inovação tecnológica na agricultura: o caso do plantio direto. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 47., 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2009. 1 CD-ROM.

BORKERT, C. M. et al. Nutrientes minerais da biomassa da parte aérea de culturas de cobertura de solo para semeadura direta com rotação de culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Anais...** Brasília: SBSC: Embrapa-CPAC, 1999.

BOTTA, G. F. et al. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine Max* L.) yields. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 53-58, 2004.

BOTTA, G. F. et al. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): effect on yields and soil under a direct sowing system. **Soil & Tillage**

Research, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 145-154, 2007.

BOUKOUNGA, J. C. **Propriedades físico-mecânicas de um argissolo sob diferentes sistemas de manejo e preparos do solo**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p.605-614, 2006.

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

BRITO, L. T. L. et al. Perdas de solo e de água em diferentes sistemas de captação *in situ* no semi-árido brasileiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 507-515, jul./set. 2008.

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

BROWN, S. et al. Soil biological processes in tropical ecosystems. In: WOOMER, P. L.; SWIFT, M. J. (Ed.). **The biological management of tropical soil fertility**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. p. 15-46.

BURLE, M. L., MIELNICZUK, J., FOCCHI, S. Effect of cropping system on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 190, n. 2, p. 309-316, 1997.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 213-220, 2000.

CALEGARI, A. Espécies para cobertura de solo. In: DAROLT, M. R. (Coord.). **Plantio direto: pequena propriedade sustentável**. Londrina: Iapar, 1998. p. 65-94. (Circular, 101).

CALEGARI, A. et al. **Adubação verde no sul do Brasil**. 2 ed. Rio de Janeiro: ASPTA, 1993. 346 p.

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

CAMPOS, B. C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 121-126, 1995.

CANELLAS, L. P. et al. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 133-143, 2000.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. Regression analysis of some factors influencing soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 167-178, 2001.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações - fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998. v. 1.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade dos agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n.1, p. 99-105, 1990.

CARVALHO, D. F. de. et al. Demanda hídrica do milho de cultivo de inverno no Estado do Rio de Janeiro, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 112-118, 2006.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho Amarelo Câmbico Fase Terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 257-265, 1999.

CASÃO JR., R.; SIQUEIRA, R. Máquinas para manejo de vegetações e semeadura em plantio direto. In: CASÃO JR.; R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R. (Ed.). **Sistema plantio direto com qualidade**. Londrina: IAPAR; Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2006. p. 85-126.

CASÃO JR., R.; ARAÚJO, A. G. de; LLANILLOET, R. F. **Plantio direto no Sul do Brasil**: fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista. Londrina: IAPAR, 2012. 77 p.

CASEIRO, F. T.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; PRIANTE FILHO, N. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura de milho (*Zea mays*, L.) no período seco, em Santo Antônio do Leverger - MT. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 177-182, 1997.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Alterações nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho eutroférrico por dois sistemas de manejo de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, p. 377-385, 2004.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M. Physical attributes of kaolinitic and oxidic oxisols resulting from different usage systems. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 5, p. 725-732, 2004.

CENTURION, J. F. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades

químicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 2, p. 267-270, 1985.

CEPIK, C. T. C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta em diferentes doses de cobertura de solo e diferentes configurações de deposição de adubo**. 2006. 117 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CERETTA, C. A. et al. Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 6, p. 729-735, 2003.

CERETTA, C. A. et al. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 49-54, 2002.

CERETTA, C. A.; PAVINATO, P. S. Adubação em linha ou a lanço no plantio direto In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 6., 2003, Ibirubá, RS. **Anais...** Ibirubá, 2003. p. 23-35.

CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; PAVINATO, A. Manejo da adubação. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 851-872.

CHAO, T. T.; ZHOU, L. Extraction techniques for selective dissolution of amorphous iron oxides from soils and sediments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 225-232, 1983.

CIOTTA, M. N. **Componentes químicos do solo influenciados por sistemas de preparo e modos de calagem em experimento de longa duração**. 2001. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2001.

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1055-1064, 2002.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru. I - Química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 483-494, 2003.

COGO, N. P. **Effect of residue cover, tillage induced-roughness, and slope length on erosion and related parameters**. 1981. 346 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Purdue University, West Lafayette, 1981.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perda de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra**

brasileira: grãos: quarto levantamento: janeiro 2011. Brasília: Conab, 2011. 25 p.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil.** 138 f. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CORNEJO, J.; HERMOSÍN, M. C. Interaction of humic substances in soil clays. In: PICCOLO, A. **Humic substances in terrestrial ecosystems.** Amsterdam: Elsevier, 1996. p. 595-624.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1231-1237, dez. 2004.

COSTA, F. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 323-332, 2008.

COSTA, F. S. et al. 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, S. E. V. G. A. **Distribuição de fósforo, potássio e raízes no perfil e crescimento do milho em um solo submetido a diferentes modos de adubação e sistemas de manejo a longo prazo.** 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CQFS-NRS. Comissão de Química e 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-Núcleo Regional Sul: EMBRAPA-CNPT, 1995. 224 p.

CQFS-NRS. Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 10 ed. Porto Alegre: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CRUZ, J. C. et al. **Manejo da cultura do milho.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. (Circular técnica, 87).

CUNHA, G. R. da. et al. 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.

DALMAGO, G. A. et al. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 855-864, 2009. Suplemento.

DEBIASI, H. **Recuperação física de um argissolo compactado e suas Implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 263 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DENARDIN, J. E. Enfoque sistêmico em sistema plantio direto – fundamentos e implicações do plantio direto nos sistemas de produção agropecuária. In: NUERNBERG, N. J. **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: SBCS Núcleo Regional Sul, 1998. p. 7-14.

DENARDIN, J. E. **Parceria entre empresas públicas e privadas na pesquisa e difusão do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Projeto METAS, 1997. 28 p. (Projeto METAS, Boletim técnico, 1).

DENARDIN, J. E. et al. Diagnóstico do Sistema Plantio Direto em áreas de produção de grãos de sequeiro dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 7., 2008, Santa Maria. **Palestras...** Santa Maria, 2008. 1 CD-ROM.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do Sistema Plantio Direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 108, 2008a.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006, Passo Fundo. **Fertilidade em solo... (re)emergindo sistêmica: resumos e palestras...** Passo Fundo: Embrapa Trigo: SBCS Núcleo Regional Sul, 2006. 8 p. 1 CD ROM.

DENARDIN, J. E. ; KOCHHANN, R. A. Requisitos para a implantação e a manutenção do sistema plantio direto. In: CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO [da] EMBRAPA; FECOTRIGO; FUNDAÇÃO ABC. (Org.). **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. v. 5, p. 19-27.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, N. D. Considerações sobre adensamento e compactação em manejo de Latossolos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1., 2001, Aracajú. **Anais...** Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 317-325.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; RIGHES, A. A. Mulching vertical: técnica de manejo de enxurradas em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 85, 2005.

DENARDIN, J. E. et al. **Efeito da consorciação milho-braquiária (Brachiaria brizantha) na mitigação da compactação do solo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 13 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 54).

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1991. 272 p.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 87-100, 1991.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, 1996.

DIEKOW, J. et al. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 year. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.

DORNELES, E. P. **Atributos químicos de Argissolo e exportação de nutrientes por culturas sob sistemas de preparo e de adubação**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; MATOSO, M. J. **Área de plantio direto e área plantada com sorgo no Cerrado: existe alguma correlação entre elas?** Sete Lagoas: EMBRAPA, 2007. 8 p. (Comunicado técnico, 151).

EGHBALL, B.; BINFORD, G. D.; BALTENSPERGER, D. D. Phosphorus movement and absorption in a soil receiving longterm manure and fertilizer application. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 25, p. 1339-1343, 2000.

EMBRAPA. **Cultivares de soja 2005/2006**: Região Centro-Sul. Londrina: Embrapa Soja: Fundação Meridional, 2006b. 70 p. (Documentos, 270).

_____. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

_____. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1999/2000**. Londrina: Embrapa Soja; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1999. 226 p. (EMBRAPA SOJA. Documentos, 132). (EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE. Documentos, 5).

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2006a. 306 p.

_____. **Tecnologias de produção de soja - região central do Brasil, 2003**. Londrina: EMBRAPA, 2002. 199 p.

ESPIRITO SANTO, F. R. C. **Distribuição de óxidos de ferro em uma catena de solos derivados de granito na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul**. 1988. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do sul,

Porto Alegre, 1988.

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FAO. **Tropical soybean**: improvement and production. Rome: FAO, 1994. 254 p. (FAO. Plant production and protection series, 27).

FARIAS, J. R. B.; et al. Caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Evolução do plantio direto no Brasil**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 05 abr. 2010.

FIORIN, J. E. Plantas recuperadoras de fertilidade do solo. In: CURSO SOBRE ASPECTOS BÁSICOS DE FERTILIDADE E MICROBIOLOGIA DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 3., 1999, Passo Fundo. **Resumos...** Aldeia Norte, 1999. 92 p.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

FONSECA, G. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Vermelho Distrófico de Cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 1, p. 22-30, 2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 127-132, 1997.

FREITAS, P. L. et al. Nível e natureza do estoque orgânico de Latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 157-170, 2000.

FREIXO, A. A. et al. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 425-434, 2002.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1489-1498, 2010.

GASSEN, D. N.; GASSEN, F. R. **Plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996. 207 p.

GAUME, A.; MÄCHLER, F.; FROSSARD, E. Aluminium resistance in two cultivars of *Zea mays* L.: root exudation of organic acids and influence of phosphorus nutrition. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 234, p. 73-81, 2001.

GODWIN, R. J.; O`DOGHERTY, M. J. Integrated soil tillage force prediction models. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 3-14, 2007.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 703-707, abr. 2001.

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

HAMILTON-MANNS, M. et al. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 2, p. 109-119, 2002.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p.121-145, 2005.

HEINRICH, R. et al. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: relação C/N da fitomassa e produtividade do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v 25, p. 331-340, 2001.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HUGGINS, D. R.; REGANOLD, J. P. **No-till: the quiet revolution**. [S.l.]: Scientific American, 2008. p. 70-77.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

INDA JUNIOR, A. V. et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1301-1307, 2007.

KAMINSKI, J. et al. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e de SC. In: REUNIÃO ANUAL DA REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO E DE TECIDO VEGETAL DOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA, 33., 2001, Frederico Westphalen. **Ata...** Frederico Westphalen, 2001. p. 21-26.

KÄMPF, N.; CURTI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1. p. 107-138.

KARATHANASIS, A. D.; WELLS, K. L. A comparison of mineral weathering trends between two management systems on a catena of loess-derived soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 582-588, 1989.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânica de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KLUTHCOUSKI, J. **Efeito de manejo em alguns atributos de um Latossolo roxo sob cerrado e nas características produtivas de milho, soja, arroz e feijão, após oito anos de plantio direto**. 1998. 179 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KLUTHCOUSKI, J. et al. **Integração lavoura-pecuária e o manejo de plantas daninhas.**, Piracicaba: Potafos, 2004. (Encarte técnico. Informações agrônômicas, 106).

LAL, R. Thematic evolution of ISTRO: transition in scientific issues and research focus from 1955 to 2000. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, n. 61, p. 3-12, 2001.

LAL, R.; REICOSKY, D. C.; HANSON, J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, n. 93, p. 1-12, 2007.

LANZANOVA, M. E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. 2005. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado - Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LEITE, L. F. C. et al. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 821-832, 2003.

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 305 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

LIPIEC, J. et al. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 307-317, 1991.

LISBOA, B. B. **Parâmetros microbiológicos como indicadores de qualidade do solo em sistemas de manejo**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LOPES, A. S. et al. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: ANDA, 2004. 110 p.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetadas por preparos do solo, sistemas de cultura e adubos nitrogenados**. 2001. 130 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.1, p. 175-187, 2004.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. 10 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular técnica, 76).

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. 1994. 172 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

MATZENAUER, R. et al. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105 p. (Boletim Fepagro, 10).

MATZENAUER, R.; MALUF, J. R. T.; SUTILI, V. R. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura para o milho em três épocas de semeadura. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 34., 1989, Porto Alegre. **Ata...** Porto Alegre: IPAGRO: EMATER-RS, 1989.

McKEAGUE, J. A.; BRYDON, J. E.; MILES, N. M. Differentiation of forms of extractable iron and aluminum in soils. **Soil Science Society of America Proceeding**, Madison, v. 35, p. 33-38, 1971.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Proceedings Clays & Clay Mineral Conference**, London, v. 7, p. 317-327, 1960.

MELLO, L. M. M.; TAKAHASHI, C. M.; YANO, E. H. Condicionamento físico do solo na linha de semeadura de milho em plantio direto: mecanismos sulcadores e rodas compactadoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

MENDES, R. S. **Determinação da evapotranspiração por métodos diretos e indiretos e dos coeficientes de cultura para a soja no Distrito Federal**. 2006. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MENEZES, L. A. S. **Alterações de propriedades químicas do solo em função da fitomassa de plantas de cobertura**. 2002. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285 p.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, R. D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Org.) **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 116-162.

MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: uma síntese histórica. **Revista Agronomia**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11-22, 1999.

MIELNICZUK, J. et al. Interações fertilidade e conservação do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM. Centro de Ciências Rurais, 2000. 15 p. 1 CD-ROM.

MIELNICZUK, J.; et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3. p. 209-248.

MIELNICZUK, J.; WÜNSCHE, W. A.; FERREIRA, T. Conservação do solo. **Revista Trigo e Soja**, Porto Alegre, v. 66, n. 1, p. 17-21, 1983.

MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G. O.; PAVAN, M. A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 209-215, 1992.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 411-416, 1993.

MORAIS, L. F. B.; COGO, N. P. Comprimentos críticos de rampa para

diferentes manejos de resíduos culturais em sistema de semeadura direta em um Argissolo Vermelho na Depressão Central-RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 1041-1051, 2001.

MOTA, F. S. et al. Análise agroclimática da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 133-138, 1996.

NEUMAIER, N. et al. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATTO, E. R. (Ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 19-44.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Relações entre os tipos e indicadores de acidez do solo em lavouras no sistema plantio direto na região do planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1217-1226, 2008.

NICOLOSO, R. D. S. **Dinâmica da material orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto**. 2005. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

NOVAIS, F. R.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

NOVAK, L. R. et al. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 12, p. 1587-1595, 1992.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p. 47-57, 1996.

O'SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325-335, 1999.

PAULETTI, V. et al. 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.

PELLEGRINI, A. **Sistemas de cultivo da cultura do fumo com ênfase às práticas de manejo e conservação do solo**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

PIRES, A. A. et al. Efeito da adubação alternativa do maracujazeiro-amarelo

nas características químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1997-2005, 2008.

PITOL, C. Espécies para cobertura do solo no Mato Grosso do Sul. In: CNPT EMBRAPA; FECOTRIGO; FUNDAÇÃO ABC. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. 166 p.

RADIN, B. et al. Estimativa da evapotranspiração da cultura do milho pelo método Penman-Monteith modificado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 185-191, 2000.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, 2005.

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

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.

REIS, A. V. et al. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2005. 307 p.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 131-146, 2002.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 15/16, p. 2339-2354, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 41-49, 2003.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 797-805, 2000.

RIBON, A. A. et al. Propriedades físicas de Latossolo e Argissolo em função de práticas de manejo aplicadas na entrelinha da cultura da seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 781-787, 2002.

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

ROSOLEM, C. A. et al. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1033-1040, jun. 2006.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 109-115, 2002.

ROSSATO, O. B. **Correção da acidez em subsuperfície em um latossolo de textura franco-arenosa sob plantio direto**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SÁ, J. C. M. et al. O plantio direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 84, 2004.

SALAZAR, F. J. et al. Nitrogen budgets for three cropping systems fertilised with cattle manure. **Biores. Technology**, New York, n. 96, p. 235-245, 2005.

SALET, R. L. et al. Como fazer uma amostragem de solo no sistema plantio direto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2., 1997, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo, EMBRAPA-CNPT, 1997. p. 205-207.

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

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 115-122, 1998.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecánica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.

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

SANTOS, H. P.; TOMM, G. O. Rotação de culturas para trigo, após quatro

anos: efeitos na fertilidade do solo em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 259-265, 1999.

SANTOS, R. D.; et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2005. 100 p.

SAS INSTITUTE. **Getting started with the SAS learning edition**. Cary, 2002. 200 p.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. 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.

SCHERER, E. E.; BALDISSERA, I. T.; NESI, C. N. Propriedades químicas de um latossolo vermelho sob plantio direto e adubação com esterco de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 123-131, 2007.

SCHERER, E. E.; NESI, C. N. Características químicas de um latossolo sob diferentes sistemas de preparo e adubação orgânica. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 3, p. 715-721, 2009.

SCHICK, J. et al. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 437-447, 2000.

SUHRE, E. et al. Sistemas de cobertura de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos de milho implantado em sucessão. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 25., 2004, Cuiabá. **Resumos expandidos...** Sete Lagoas, 2004. 1 CD-ROM.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurem Ammoniumoxalat-Lösung. **Z. Pflanzenernähr**, Bodenkd, v. 105, p. 194-202, 1964.

SCHWERTMANN, U. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 130, p. 1-25, 1991.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

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

SECCO, D. et al. Produtividade da soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SEDIYAMA, T. (Org.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. 1. ed. Londrina, PR: Mecenas, 2009. 314 p. v. 1.

SELLES, F. et al. Distribution of phosphorus fractions in Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 23-34, 1997.

SEYBOLD, C. A. et al. Quantification of soil quality. In: LAL, R. et al. (Ed.). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 387-404.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010. 141 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, p. 194-204, 2006.

SIDIRAS, N; PAVAN, M. A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 249-254, 1985.

SILVA, A. A. et al. Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 928-935, 2007.

SILVA, C. C.; SILVEIRA, P. M. Influência de sistemas agrícolas em características químico-físicas do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 3, p. 505-515, 2002.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 311-317, 1998.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agrônômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I – Efeito na produção de milho e adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 487-495, 2002.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 253-260, mar/abr. 2001.

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

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 191-199, 2000.

SILVA NETO, L. de F. da. Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1873-1881, 2008.

SIQUEIRA, R. **Milho**: semeadoras-adubadoras para sistema plantio direto com qualidade. Londrina: IAPAR, 2009. 34 p.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 93-111, 1997.

SOBRAL, H. R. Globalização e meio ambiente. In: DOWBOR, L.; IANNI, O. P.-E. A (Org.). **Desafios da globalização**. Petrópolis, RJ: Vozes, 1999.

SODRÉ FILHO, J. et al. Fitomassa em cobertura do solo de culturas de sucessão ao milho na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 237-234, 2004.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. **Acidez do solo e sua correção**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2007. 1017 p.

SOUZA, C. M. A. de et al. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 460-464, 2000.

SPEHAR, C. R. Avaliação de espécies para a diversificação de safrinha no cerrado. **Jornal Direto no Cerrado**, v. 6, n. 20, p. 8, 2001.

SPERA, S. T. et al. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2613-2620, 2008. Número especial.

STEPNIEWSKI, W. et al. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 167-189.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry**: genesis, composition and reactions. 2. ed. New York: J. Wiley, 1994. 496 p.

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

STÜRMER, S. L. K. et al. Variações nos teores de carbono orgânico em função do desmatamento e revegetação natural do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 241-250, abr.-jun., 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: Benjamin/Cummings Publishing Company, 1991. 565 p.

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARAES, R. J. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1039-1047, 2003.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 2nd. ed. New York: Macmillan, 1966. 694 p.

TORMENA, C. A. **Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo**. 106 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

TORMENA, C. A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (EMBRAPA SOJA. Circular técnica, 23).

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1609-1618, 2008.

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 105-111, 1991.

TULLBERG, J. N. Wheel traffic effects on tillage draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 75, n. 4, p. 375-82, 2000.

UEHARA, G. Agric properties and their significance to soil classification. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8., 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Embrapa/SNLCS, 1988. p. 19-22.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

VERNETTI JUNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S.; SCHUCH, L. O. B. Sustentabilidade de sistemas de rotação e sucessão de culturas em solos de várzea no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1708-1714, set, 2009.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIEIRA, F. C. B. **Estoques e labilidade da matéria orgânica e acidificação de um Argissolo sob plantio direto afetado por sistemas de cultura e adubação nitrogenada.** 2007. 123 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C.; VIEIRA, M. N. S. **Solos:** propriedade, classificação e manejo. Brasília: MEC/ABEAS, 1988. p. 53-61. Programa Agricultura nos Trópicos.

WISNIEWSKI, C.; HOLTZ, G. P. Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 11, p. 1191-1197, 1997.

XAVIER, A. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta.** 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ZANELLI, R. et al. Vegetation effects on pedogenetic forms of Fe, Al and Si and on clay minerals in soils in Southern Switzerland and Northern Italy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 141, p. 119-129, 2007.

9 APÊNDICES

Apêndice 1. Descrição morfológica geral do solo estudado**PERFIL:** 1**DATA:** 07/07/2011**CLASSIFICAÇÃO:** ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico**SITUAÇÃO:** descrito e coletado em trincheira escavada em trecho médio da coxilha**LOCALIZAÇÃO:** Estação Experimental Agronômica UFRGS/PRONEX, no município de Eldorado do Sul (COORDENADA – 22J – S 6670331S; E 434395)**ALTITUDE:** 40m**SITUAÇÃO E DECLIVE DO PERFIL:** 1 – 3%**RELEVO LOCAL:** Plano a suave ondulado**RELEVO REGIONAL:** Suave ondulado**EROSÃO:** não aparente**DRENAGEM:** bem drenado**PEDREGOSIDADE:** Não pedregoso**ROCHOSIDADE:** não rochoso**LITOLOGIA:** Rochas ígneas/Rochas metamórficas**MATERIAL DE ORIGEM:** Granito/Gnaiss**CRONOLOGIA:** Pré-Cambriano/Paleozóico**FORMAÇÃO GEOLÓGICA:** Escudo Sulriograndense**VEGETAÇÃO PRIMÁRIA:** Estepe (Campos do sul do Brasil) - Arborizada com florestas de galeria**USO ATUAL:** Campo Nativo**CLIMA:** Cfa, da classificação de Köppen.**DESCRITO E COLETADO POR:** NASCIMENTO, P. C.; MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H.**B. Descrição Morfológica**

A1	0 – 8 cm; 7,5YR 3/3 (úmido); franca arenosa; fraca, pequena, granular; friável, não plástico e não pegajoso a ligeiramente pegajoso; transição plana e clara; raízes muitas.
A2	8 – 35 cm; 7,5YR 3/4 (úmido); franca arenosa; fraca, pequena, blocos angulares e subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual; raízes comuns.
AB	35 – 60 cm; 5YR 3/4 (úmido); franco argilo arenosa; moderada, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso a pegajoso; transição plana e gradual; poucas raízes.
BA	60 – 85 cm; 5YR 4/6 (úmida); franco argilo arenosa; moderada, média, blocos subangulares; friável a firme, ligeiramente plástico, pegajoso; transição gradual; raízes raras.
Bt1	85 – 110 cm; 2,5YR 3/4 (úmida); franca argilosa; firme, ligeiramente plástico, pegajoso; transição gradual.
Bt2	110 – 130+ cm; 2,5YR 4/6 (úmida); argilosa; muito firme, plástico, pegajoso.

Apêndice 2. Quantidades cumulativas dos elementos N, P, K, C orgânico e de equivalente CaCO_3 aplicadas no período de 2000-2010 para os tratamentos com adubação mineral e orgânica e sistemas de culturas. Eldorado do Sul, 2010. Fonte: Dorneles (2011)

Elemento	Adubação mineral		Adubação orgânica	
	Sucessão	Rotação	Sucessão	Rotação
N, kg ha^{-1}	543	636	780	849
P_2O_5 , kg ha^{-1}	715	715	1.191	1.288
K_2O , kg ha^{-1}	101	101	984	1.071
C orgânico, t ha^{-1}	-	-	11,4	12,6
Eq CaCO_3 , t ha^{-1}	3,7	3,7	3,13	3,50

Apêndice 3. Caracterização química da cama de aviário (três lotes) utilizada como fertilizante orgânico e quantidades totais de elementos aportados no período de 2000-2010 para os tratamentos com adubação orgânica. Eldorado do Sul, 2010. Fonte: Dorneles (2011)

Característica	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Quantidade (kg ha ⁻¹)	
				S ⁽¹⁾	R ⁽²⁾
Umidade, %	22,5	22	24	-	-
C orgânico, %	30	29	35	11.442	12.588
N total, %	1,8	2,6	2,4	780	849
P ₂ O ₅ total, %	2,52	4,58	3,66	1.191	1.288
K ₂ O total, %	2,28	3,84	2,64	984	1.071
Ca total, %	8,1	3,2	1,7	1.924	2.233
Mg total, %	0,56	1	0,79	261	282
S total, %	0,40	0,40	0,34	140	155
Fe total, %	0,11	0,53	0,95	161	165
Na total, %	0,76	0,64	0,33	223	252
Cu total, mg/kg	61	524	281	7,9	8,1
Zn total, mg/kg	454	508	287	15,2	16,9
Mn total, mg/kg	448	816	457	19,1	20,8
B total, mg/kg	17	22	32	0,82	0,88
Cd total, mg/kg	nd ⁽³⁾	nd	0,3	0,011	0,012
Cr total, mg/kg	nd	nd	11	0,40	0,44
Ni total, mg/kg	nd	nd	13	0,48	0,53
Pb total, mg/kg	nd	nd	4	0,15	0,16
pH	8,8	8,7	8,9	-	-
Época de uso	Ver. 00/01 a Inv. 03	Ver. 03/04 a Ver. 05/06	Ver. 06/07	-	-

Observações: ⁽¹⁾ S – sucessão de culturas; ⁽²⁾ R – rotação de culturas; ⁽³⁾ nd – não determinado.

Apêndice 4. Análise química do solo no início do experimento nas glebas I e II. Eldorado do Sul-RS, 2000

GLEBA I

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻¹	K mg ₃ dm ⁻¹	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.2	6.0	7.4	190	0.2	3.3	1.6
5 – 10	5.4	6.1	5.1	158	0.0	3.0	1.3
10 – 15	5.5	6.2	3.8	166	0.0	3.6	1.6
15 – 20	5.6	6.1	3.3	145	0.0	3.2	1.6

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol ₃ dm ⁻¹	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.4	3.6	9.1	61	2.2	2.0	7	3.4
5 – 10	2.6	3.3	8.0	59	0.0	2.3	7	3.2
10 – 15	2.4	3.0	8.6	65	0.0	2.3	8	3.8
15 – 20	2.3	3.3	8.4	61	0.0	2.0	9	4.3

GLEBA II

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻¹	K mg ₃ dm ⁻¹	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.4	6.0	4.3	236	0.0	3.5	1.8
5 – 10	5.4	6.0	2.9	176	0.1	3.2	1.5
10 – 15	5.3	5.9	2.1	150	0.2	3.3	1.6
15 – 20	5.2	5.9	2.2	123	0.2	3.2	1.5

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol ₃ dm ⁻¹	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.0	3.4	9.3	63	0.5	1.9	6	3.0
5 – 10	2.5	3.6	8.7	59	1.1	2.1	7	3.3
10 – 15	2.3	3.9	9.2	58	2.2	2.1	9	4.2
15 – 20	2.1	3.9	8.9	56	2.2	2.1	10	4.8

Apêndice 5. Análise química do solo no início do experimento nas glebas III e IV. Eldorado do Sul-RS, 2000

GLEBA III

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻¹	K mg ₃ dm ⁻¹	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.0	5.8	2.3	193	0.3	2.8	1.4
5 – 10	5.0	5.8	1.6	116	0.4	2.7	1.4
10 – 15	5.1	5.8	1.4	96	0.6	2.5	1.3
15 – 20	5.0	5.8	1.2	94	0.4	2.2	1.0

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol ₃ dm ⁻¹	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	2.9	4.3	8.9	52	3.9	2.0	5	2.8
5 – 10	2.4	4.3	8.7	51	4.6	1.9	9	4.7
10 – 15	2.2	4.3	8.3	49	7.2	1.9	10	5
15 – 20	1.9	4.3	7.7	45	5.2	2.2	9	4.1

GLEBA IV

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻¹	K mg ₃ dm ⁻¹	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.3	5.9	2.4	257	0.1	3.2	1.4
5 – 10	5.0	5.8	1.6	197	0.3	2.6	1.2
10 – 15	5.1	5.9	1.5	131	0.3	2.9	1.4
15 – 20	5.0	5.8	1.2	101	0.4	2.7	1.3

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol ₃ dm ⁻¹	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.2	3.8	9.0	58	1.1	2.2	4.8	2.1
5 – 10	2.4	4.3	8.6	50	3.5	2.2	5	2.4
10 – 15	2.2	3.9	8.5	54	3.5	2.1	9	4.2
15 – 20	2.1	4.3	8.5	50	4.7	2.1	10	5

Apêndice 6. Análise química do solo no início do experimento nas glebas V e VI. Eldorado do Sul-RS, 2000

GLEBA V

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.2	5.8	3.2	230	0.2	3.3	1.6
5 – 10	5.2	5.6	5.8	152	0.3	2.8	1.4
10 – 15	5.2	5.9	1.9	116	0.3	2.7	1.2
15 – 20	5.1	5.7	1.6	111	0.5	2.4	1.3

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.3	4.1	9.6	57	2.6	2.0	6	2.7
5 – 10	2.5	5.1	9.7	47	3.1	2.0	7	3.6
10 – 15	2.3	3.9	8.1	52	3.7	2.3	9	4.0
15 – 20	1.9	4.7	8.7	46	5.8	1.8	8	4.6

GLEBA VI

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.2	5.7	3.2	201	0.1	1.7	0.9
5 – 10	5.1	5.8	2.7	143	0.1	1.2	0.3
10 – 15	5.1	5.9	1.8	98	0.1	1.3	0.6
15 – 20	5.1	5.8	1.6	88	0.3	1.4	0.8

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.4	4.5	7.6	41	1.4	1.9	3.4	1.7
5 – 10	3.2	4.3	6.1	30	1.6	4.0	3.3	0.8
10 – 15	2.4	3.9	6.1	36	1.7	2.2	5	2.4
15 – 20	2.6	4.3	6.7	36	4.5	1.8	6	3.5

Apêndice 7. Análise química do solo no início do experimento na gleba VIII.
Eldorado do Sul-RS, 2000

GLEBA VIII

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻¹	K mg ₃ dm ⁻¹	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.3	5.9	3.2	184	0.1	2.0	0.9
5 – 10	5.4	6.0	2.1	116	0.1	2.0	0.9
10 – 15	5.3	6.0	1.6	90	0.1	1.9	0.8
15 – 20	5.2	5.8	1.5	80	0.2	2.0	1.0

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol ₃ dm ⁻¹	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.1	3.9	7.3	46	1.3	2.1	4.3	2.0
5 – 10	2.8	3.6	6.8	47	1.5	2.2	7	3.0
10 – 15	2.8	3.6	6.5	45	1.5	2.4	8	3.5
15 – 20	2.5	4.3	7.5	43	2.7	2.0	10	4.9

Apêndice 8. Análise química do solo nos tratamentos PD1 e PD2, após dez anos da implementação dos distintos manejos de culturas e adubação. Eldorado do Sul-RS, 2010

TRATAMENTO: PD1

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{trocc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{trocc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{trocc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	6.3	6.8	26	235	0.0	6.5	3.1
5 – 10	5.8	6.6	9.8	129	0.0	4.3	2.3
10 – 15	6.0	6.6	6.7	73	0.0	4.1	1.9
15 – 20	5.8	6.4	6.7	52	0.0	3.6	2.0

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	4.0	1.7	12.0	85	0.0	2.1	11	5
5 – 10	2.7	2.2	9.3	75	0.0	1.9	13	7
10 – 15	1.9	2.2	8.4	74	0.0	2.2	22	10
15 – 20	1.7	2.8	8.5	67	0.0	1.8	27	15

TRATAMENTO: PD2

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{trocc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{trocc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{trocc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	6.3	6.7	23	239	0.0	7.1	3.7
5 – 10	5.8	6.6	8.1	146	0.0	4.0	2.3
10 – 15	5.8	6.6	3.6	133	0.0	3.7	1.8
15 – 20	5.3	6.2	9.2	83	0.4	2.8	1.5

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.8	2.0	13.5	85	0.0	1.9	12	6
5 – 10	3.0	2.2	9.0	74	0.0	1.7	11	6
10 – 15	2.1	2.2	8.1	72	0.0	2.1	11	5
15 – 20	1.9	3.5	8.0	56	8.1	1.9	13	7

Apêndice 9. Análise química do solo nos tratamentos PD3 e PD4, após dez anos da implementação dos distintos manejos de culturas e adubação. Eldorado do Sul-RS, 2010

TRATAMENTO: PD3

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	6.4	6.9	17	249	0.0	7.2	3.7
5 – 10	5.8	6.6	11	134	0.0	4.7	2.6
10 – 15	6.2	6.4	10	134	0.0	4.8	2.1
15 – 20	5.7	6.5	8.2	97	0.0	3.2	1.6

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.8	1.6	13.2	88	0.0	1.9	11	6
5 – 10	3.0	2.2	10.0	77	0.0	1.8	14	8
10 – 15	2.1	2.8	10.0	72	0.0	2.3	14	6
15 – 20	1.8	2.5	7.5	67	0.0	2.0	13	6

TRATAMENTO: PD4

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.9	6.5	53	265	0.0	7.0	2.1
5 – 10	5.5	6.3	11	151	0.0	3.8	1.6
10 – 15	5.2	6.2	3.7	122	0.4	2.8	1.0
15 – 20	5.0	6.0	3.0	122	0.9	2.4	1.0

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	6.0	2.5	12.3	79	0.0	3.3	10	3.1
5 – 10	3.1	3.1	9.0	64	0.0	2.4	10	4.1
10 – 15	2.0	3.5	7.6	54	8.8	2.8	9	3.2
15 – 20	1.9	4.4	8.1	46	19.4	2.4	8	3.2

Apêndice 10. Análise química do solo nos tratamentos PD5 e CN, após dez anos da implementação dos distintos manejos de culturas e adubação. Eldorado do Sul-RS, 2010

TRATAMENTO: PD5

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	6.2	6.7	74	287	0.0	10.7	3.1
5 – 10	5.9	6.6	16	203	0.0	5.5	2.1
10 – 15	5.3	6.2	3.6	140	0.2	3.4	1.5
15 – 20	5.2	6.0	2.7	123	0.3	2.9	1.3

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	5.2	2.0	16.5	88	0.0	3.5	15	4.2
5 – 10	3.7	2.2	10.3	79	0.0	2.6	11	4.0
10 – 15	2.3	3.5	8.8	60	3.6	2.3	9	4.2
15 – 20	2.1	4.4	8.9	51	6.2	2.2	9	4.1

Tratamento: CN

Análise química

Camada (cm)	pH H ₂ O	Índice SMP	P mg ₃ dm ⁻³	K mg ₃ dm ⁻³	Al _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Ca _{troc.} Cmol _c dm ⁻³	Mg _{troc.} Cmol _c dm ⁻³
0 – 5	5.2	6.0	2.9	131	0.3	2.5	2.0
5 – 10	4.9	6.0	1.4	103	1.1	1.9	1.3
10 – 15	4.9	6.0	1.3	80	1.0	2.7	1.7
15 – 20	4.9	5.9	1.4	63	0.9	2.1	1.1

Camada (cm)	M.O %	H+Al Cmol _c dm ⁻³	CTC Cmol _c dm ⁻³	% Sat. da CTC		Relações		
				Bases	Al	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
0 – 5	3.4	4.4	9.3	52	5.7	1.3	7	6
5 – 10	2.6	4.4	7.9	44	23.7	1.5	7	4.9
10 – 15	2.5	4.4	9.0	51	17.6	1.6	13	8
15 – 20	2.2	4.9	8.3	40	20.8	1.9	13	7