

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

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
ÁREAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA
SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rodrigo da Silveira Nicoloso

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS
DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA SOB SISTEMA
PLANTIO DIRETO**

por

Rodrigo da Silveira Nicoloso
Engenheiro Agrônomo

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

Orientador: Prof. Dr. Thomé Lovato

Santa Maria, RS, Brasil

2005

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

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

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA SOB SISTEMA PLANTIO
DIRETO**

elaborada por
Rodrigo da Silveira Nicoloso

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Thomé Lovato, Dr.
(Presidente/Orientador)

Cimélio Bayer, Dr. (UFRGS)

Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 30 de Maio de 2005.

Àqueles que, embora a presença só consigo sentir no coração e no pensamento, guiam e iluminam o meu caminho;

Àqueles que me receberam neste mundo e me inspiram bondade, honestidade, respeito e amor incondicional;

Àquela, parceira nas lutas do dia-a-dia, que soube cultivar em mim o amor;

À memória de meus avós, SUL e MARINA, meus pais JOSÉ e MARA e minha companheira TATIANA, com todo o meu amor, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que do alto de sua infinita bondade, amor e sabedoria, nos permitiu a vida e nos chamou a contribuir junto a sua obra, evoluindo no caminho do bem e do amor. À Jesus, mestre e guia no caminho da evolução. À Ele que guarda meus passos, perdoa meus erros e ajuda a reerguer-me após os tombos da vida.

À meus pais José e Mara, que lutaram pelo meu sustento durante todos estes anos e por terem acreditado em mim e estimulado a prosseguir nesta jornada. Pelas oportunidades e pelos puxões de orelha. Pela lição de vida que é conviver com vocês, nos bons e nos maus momentos.

À minha irmã Carolina, que apesar da divergências normais da vida, torna possível um sentimento de amor recíproco. À minha sobrinha Antônia, por trazer mais alegria a nossas casas com sua vida que começa.

À Tatiana, companheira de todas as horas, por seu amor, carinho, dedicação e desprendimento, que me enche de coragem e ânimo para enfrentar os desafios da vida e trilhar nosso futuro.

Aos meus demais familiares e minha avó Maria de Lourdes, pelo exemplo de suas vidas e convivência.

À todos meus amigos e companheiros de pescaria, pelas horas de descontração e alegria, pois afinal, a vida também se faz destes momentos.

Aos professores do setor de Manejo e Conservação do Solo e da Água, pelo companheirismo e auxílio prestimoso, e especialmente ao Prof. Thomé Lovato, pela amizade, exemplo, estímulo e orientação durante estes anos de convívio.

Aos colegas do programa de pós-graduação em ciência do solo da UFSM, em especial ao colega e amigo Mastrângello Lanzanova, pela amizade e ajuda inestimável na condução deste trabalho.

Aos alunos de graduação em Agronomia da UFSM, que voluntariamente auxiliaram na execução deste trabalho: Felipe Facco, Vitor Girardello, Vagner Lopes, Jardes Bragagnolo, Luciano Pizzuti, Gustavo Bellé e Ricardo Fülber.

À UFSM, que através do PPG em Ciência do Solo, me acolheu como aluno e ao CNPq, pela bolsa de mestrado.

A todos os funcionários da Agropecuária Capitão Rodrigo e depois pessoas, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

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

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

AUTOR: RODRIGO DA SILVEIRA NICOLOSO

ORIENTADOR: PROF. THOMÉ LOVATO

Local e data da Defesa: Santa Maria, 30 de Maio de 2005.

A Integração Lavoura-Pecuária no sul do Brasil baseia-se principalmente na exploração de culturas produtoras de grãos, durante o verão, e na produção de carne bovina sobre pastagens de estação fria, durante o inverno. Esta atividade vem se expandindo rapidamente no Rio Grande do Sul, devido ao aumento da área de cultivo da soja sobre áreas de campo nativo e da necessidade de se melhorar os índices de produtividade da pecuária neste estado. No entanto, poucos trabalhos de pesquisa existem até o momento, a fim de indicar quais os melhores sistemas de manejo destas áreas, tendo em vista seu caráter distinto da agricultura e da pecuária quando atividades isoladas. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência do aumento da intensidade de utilização das pastagens de inverno e diferentes sistemas de culturas de verão sobre a dinâmica da MOS e de suas frações granulométricas – particulada e associada a minerais – nestas áreas, bem como a produtividade de grãos e de carne alcançadas. Para tanto instalou-se um experimento a campo sobre um Argissolos Vermelho-Amarelo Alumínico típico, no município de Jari – RS, com delineamento experimental blocos ao acaso com parcelas dispostas em distribuição fatorial, com quatro repetições, que constou da utilização de três sistemas de manejo das pastagens de inverno, que eram compostas de Aveia Preta e Azevém, sendo eles: sem pastoreio (SP), pastoreio a cada 28 dias (P28) e pastoreio a cada 14 dias (P14), compondo assim frequências crescentes de pastoreio sobre estas pastagens; e três sistemas de culturas de verão, a saber: monocultura de soja (Mon-S), monocultura de milho (Mon-M) e rotação soja/milho (Rot-S/M). Observou-se que o ganho de peso vivo animal durante o inverno não foi significativamente beneficiado pelo aumento da frequência de pastoreios, porém a produção de fitomassa para cobertura de solo pelas pastagens

e o rendimento de grãos das culturas de verão foi reduzido quando aumentou-se a intensidade de utilização das pastagens de inverno pelos animais. As adições de C ao solo via resíduos vegetais variou entre 2,92 e 7,59 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, para os tratamentos P14 Mon-S e SP Mon-M, respectivamente. A principal fração da MOS afetada pelo manejo empregado em cada tratamento foi a fração particulada (COp), sendo que os estoques de CO nesta fração se mostraram 49 vezes mais sensíveis ao manejo aplicado sobre as pastagens de inverno do que a fração associada a minerais (COam). A aplicação do modelo matemático unicompartmental de Hennín & Dupuis para a modelagem dos estoques de cada fração da MOS demonstrou a maior velocidade de ciclagem do COp, em relação aos estoques de COT e COam. O coeficiente k_1 (taxa de humificação do C adicionado ao solo) do modelo matemático obtidos foram de 0,1215, 0,0936 e 0,1249 ano⁻¹, para o COp, COam e COT, respectivamente, enquanto que o coeficiente k_2 (taxa de mineralização do CO) foram de 0,1292, 0,0161 e 0,0185 ano⁻¹, para os mesmos compartimentos da MOS. Utilizando estes dados, simulou-se que os estoques de COp e COT na camada 0-10 cm na estabilidade serão de 2,75 e 19,73 Mg ha⁻¹, respectivamente, para o tratamento P14 Mon-S, e de 7,13 e 51,21 Mg ha⁻¹, respectivamente, para o tratamento SP Mon-M. Além disto, o $t_{1/2}$ (tempo de meia vida) do COp, COam e COT calculados foram de 5, 43 e 37 anos, respectivamente, e o TMP (tempo médio de permanência) calculados foram de 8, 62 e 54 anos, para os mesmos compartimentos, respectivamente. O solo nos tratamentos que não receberam pastoreios durante o inverno apresentaram bom potencial para seqüestro de CO₂ atmosférico, enquanto que o aumento da intensidade de pastoreios reduziu este potencial, passando a atuar como fonte de CO₂ para a atmosfera quando aplicou-se a maior frequência de pastoreios. Os estoques de NTp foram também mais sensíveis ao manejo do pastoreio e de culturas do que os estoques de NTam ou NT, sendo que os maiores estoques foram observados quando utilizou-se a soja em monocultivo nas áreas que não receberam pastoreio e os menores quando o milho foi cultivado em monocultura em áreas que receberam uma frequência de pastoreio de 14 dias no inverno.

Palavras-chaves: Integração Lavoura-Pecuária, Sistema Plantio Direto, Fracionamento da Matéria Orgânica do Solo, Modelagem da Matéria Orgânica do Solo, Qualidade do Solo.

ABSTRACT

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

SOIL ORGANIC MATTER DYNAMICS ON CATTLE RAISING AND CROP PRODUCTION INTEGRATED SYSTEMS UNDER NO TILLAGE

AUTHOR: RODRIGO DA SILVEIRA NICOLOSO

ADVISER: PROF. THOMÉ LOVATO

Defense local and date: Santa Maria, May 30, 2005.

The cattle breeding and crop production integrated systems in the south of Brazil is based mostly on grain production with summer crops and beef cattle production over winter pastures. This activity have been expanded quickly in the state of Rio Grande do Sul, due the increase of soybean cultivation over native grass fields areas and the requirement to improve the livestock productivity index in that state. However, few research works exists until this moment to show the best management systems to this areas mainly due to its distinct character of agriculture and livestock when are isolated activities. With this meaning, this work has the purpose to evaluate the effect in increase use intensity of winter pastures and different summer crops systems over the soil organic matter (SOM) dynamics and its granulometric fractions – particulate and mineral associated SOM – on this areas and the grain and beef cattle yield achieved. For that, a field experiment was carried out over a Palehudult soil, on the city of Jari – RS, with complete randomized blocks experimental design on factorial treatment distribution, four replications, with the utilization of three winter pastures management systems: no grazing (NG), grazing even 28 days (G28) and grazing even 14 days (G14), composing in this way increasing grazing frequencies over that pastures; and three summer crops systems: soybean monoculture (Mon-S), corn monoculture (Mon-C) and soybean/corn rotation (Rot-S/C). The beef cattle yield during the winter was not significantly affected by the increase of the grazing frequencies, but the biomass production to soil cover by the pastures and the grain yield of summer crops was reduced when the use intensity of the winter pastures by the animals was increased. The C addition to the soil by vegetal residues varied between 2.92 and 7.59 Mg ha⁻¹ year⁻¹ to the treatments G14

Mon-S and NG Mon-M, respectively. So, the main SOM fraction affected by the employed management in each treatment was the particulate fraction, expressed by the POM-C pool. This pool showed be 49 times more sensitive to the applied management over the winter pastures than the mineral associated fraction, expresses by the AMOM-C pools. The application of the Hennín & Dupuis's mathematical model to the prediction of each pools of SOM showed higher turnover rates of POM-C, in relation to the SOC and AMOM-C pools. The k_1 coefficient (humification rate of the C added to the soil) obtained by the mathematical model was 0.1215, 0.0936 and 0.1249 year⁻¹, to POM-C, AMOM-C and SOC, respectively, while the k_2 coefficient (mineralization rate of de SOC) was 0.1292, 0.0161 and 0.0185 year⁻¹, to the same pools. Using this data, the POM-C and SOC simulated pools on stability were 2.75 and 19.73 Mg ha⁻¹, respectively, to the treatment G14 Mon-S, and 7.13 and 51.21 Mg ha⁻¹, respectively, to the treatment NG Mon-M. The $t_{1/2}$ (half-life time) for POM-C, AMOM-C and SOC were 5, 43 and 37 years, respectively, and the MRT (mean residence time) were 8, 62 and 54 years, to the same pools, respectively. The treatments that not received grazing during the winter showed good potential to the atmospheric CO₂ sequestration, while the increase of the grazing intensity reduced this potential, passing to actuate like a sink of atmospheric CO₂ when the G28 and G14 frequencies had been applied. The POM-N pools had been equally more sensitive to the grazing and crop management applied than the AMOM-N or TN pools, being that the higher pools had been observed when soybean was utilized on monoculture over the areas that not received grazing and the lowers pools had been observed when the corn was cultivated on monoculture over areas that received grazing even 14 days during the winter.

Keywords: Cattle raising and crop production integrated systems, no tillage, soil organic matter fractionating, soil organic matter modeling, soil quality.

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 – Resultado da análise de fertilidade do solo, antes da implantação do experimento de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	48
TABELA 2 – Análise granulométrica do perfil de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2001.	48
TABELA 3 – Lotação animal, período de pastoreio e ganho de peso animal em função da frequência de pastoreio empregada sobre as pastagens de inverno em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	60
TABELA 4 – Adições anuais de C pelos resíduos das culturas de verão e pastagens de inverno em função da frequência de pastoreio e sistema de culturas de verão em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	68
TABELA 5 – Adições de C pelos resíduos das culturas de verão e pastagens de inverno em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico no 4º ano. ACR, Jari – RS, 2004.	69
TABELA 6 – Estoques de COT, COp e COam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	75

TABELA 7 – Estoques ajustados de COT, COp e COam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	76
TABELA 8 – Estoques de COp e COam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno e o sistema de culturas de verão, ajustados pela densidade do solo no campo nativo. ACR, Jari – RS, 2005.	77
TABELA 9 – Índice de Manejo de Carbono de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	83
TABELA 10 – Adições de C (A), carbono adicionado convertido em CO (Ak_1), CO observado, CO estimado, CO na estabilidade (C_e), coeficiente k_2 e tempo de meia vida ($t_{1/2}$) dos estoques de COT, COp e COam na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	89
TABELA 11 – Estoques de NT, NTp e NTam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	108
TABELA 12 – Estoques ajustados de NT, NTp e NTam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	109
TABELA 13 – Estoques de NTp e NTam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno e o sistema de culturas de verão, ajustados pela densidade do solo no campo nativo. ACR, Jari – RS, 2005.	110

TABELA 14 – Relação C/N das frações granulométricas de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistema de culturas de verão e do campo nativo. ACR, Jari – RS, 2005.	113
TABELA 15 – Disponibilidade de P e K na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função das freqüências de pastoreios e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	118
TABELA 16 – Coeficientes de correlação entre os parâmetros de solo avaliados na camada 0 – 10 cm e rendimento das culturas de verão, considerando as freqüências de pastoreios aplicadas e sistemas de culturas de verão sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2005.	120
TABELA 17 – Coeficientes de correlação entre os parâmetros de solo avaliados na camada 0 – 10 cm e rendimento das culturas de verão, considerando apenas a média dos tratamentos que compõem cada freqüência de pastoreios aplicada sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2005.	121

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 – Croqui esquemático do experimento retratando a disposição dos tratamentos durante o verão.	50
FIGURA 2 – Ordenação teórica dos níveis de qualidade do solo expressos pelos compartimentos do CO do solo, propostos para o trabalho, em função da frequência de pastoreio aplicada no inverno e sistemas de culturas de verão.	53
FIGURA 3 – Evolução da disponibilidade de matéria seca das pastagens de inverno em função da frequência de pastoreio utilizada em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	59
FIGURA 4 – Ganho de peso animal em função da frequência de pastoreio e sistema de culturas de verão empregado em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	61
FIGURA 5 – Produção final de matéria seca das pastagens de inverno em função da frequência de pastoreios empregada, do sistema de monocultura ou rotação das culturas de verão e da cultura de verão antecedente em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	63
FIGURA 6 – Rendimento de grãos de soja (a) e milho (b) em função da frequência de pastoreio no inverno e sistema de monocultura ou rotação de	

soja/milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.	65
FIGURA 7 – Teores de CO _p (>53 µm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005.	70
FIGURA 8 – Teores de CO _{am} (<53 µm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005.	71
FIGURA 9 – Teores de COT em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005.	72
FIGURA 10 – Estoques de CO nas frações particulada (a), associada a minerais (b) e total (c) na camada de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão empregado. ACR, Jari – RS, 2005.	81
FIGURA 11 – Variação percentual dos estoques de COT, CO _{am} e CO _p de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em relação ao campo nativo em função das freqüências de pastoreio (a) e sistemas de culturas empregado (b). ACR, Jari – RS, 2005.	82
FIGURA 12 – Correlação entre adições anuais de C via resíduos vegetais e variação anual dos estoques de COT na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.	85
FIGURA 13 – Correlação entre adições anuais de C via resíduos vegetais e variação anual dos estoques de CO _p na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no	

inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005. 86

FIGURA 14 – Correlação entre adições anuais de C via resíduos vegetais e variação anual dos estoques de CO_{am} na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005. 87

FIGURA 15 – Simulação dos estoques de CO_p, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno. SP (a), P28 (b) e P14 (c). ACR, Jari-RS, 2005. 92

FIGURA 16 – Simulação dos estoques de CO_p, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função do sistema de culturas. Mon-S (a), Mon-M (b) e Rot-S/M (c). ACR, Jari-RS, 2005. 93

FIGURA 17 – Simulação dos estoques de CO_{am}, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno. SP (a), P28 (b) e P14 (c). ACR, Jari-RS, 2005. 94

FIGURA 18 – Simulação dos estoques de CO_{am}, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função do sistema de culturas. Mon-S (a), Mon-M (b) e Rot-S/M (c). ACR, Jari-RS, 2005. 95

FIGURA 19 – Simulação dos estoques de COT, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno. SP (a), P28 (b) e P14 (c). ACR, Jari-RS, 2005. 96

FIGURA 20 – Simulação dos estoques de COT, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função do sistema de culturas. Mon-S (a), Mon-M (b) e Rot-S/M (c). ACR, Jari-RS, 2005.	97
FIGURA 21 – Saldo líquido acumulado de seqüestro ou emissão de C-CO ₂ de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico, após 4 anos de condução do experimento em função da freqüência de pastoreio sobre as pastagens de inverno e sistemas de culturas de verão empregado. ACR, Jari – RS, 2005. .	100
FIGURA 22 – Incremento relativo dos estoques de COp, COam e COT e do IMC, na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico, segundo a freqüência de pastoreios empregada no inverno e sistema de culturas de verão em relação ao tratamento P14 Mon-S. ACR, Jari – RS, 2005.	102
FIGURA 23 – Teores de NTp (>53 µm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005.	105
FIGURA 24 – Teores de NTam (<53 µm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. ^{ns} Teste F não significativo a 5%.	106
FIGURA 25 – Teores de NT em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. ^{ns} Teste F não significativo a 5%.	107
FIGURA 26 – Estoques de NT nas frações particulada (a), associada a minerais (b) e total (c) na camada de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão empregado. ACR, Jari – RS, 2005.	115

FIGURA 27 – Variação percentual dos estoques de NT, NTam e NTp de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em relação ao campo nativo em função das frequências de pastoreio (a) e sistemas de culturas empregado (b). ACR, Jari – RS, 2005.

LISTA DE ANEXOS

	Página
ANEXO A – Vista da área experimental durante o inverno de 2004.	140
ANEXO B – Aspecto da vegetação na área que não recebeu pastoreios durante o inverno. Setembro de 2004.	141
ANEXO C – Disponibilidade de forragem na área que recebeu pastoreios a cada 28 dias. Setembro de 2004.	142
ANEXO D – Disponibilidade de forragem na área que recebeu pastoreios a cada 14 dias. Setembro de 2004.	143
ANEXO E – Realização dos pastoreios. Inverno de 2004.	144
ANEXO F – Detalhe dos animais pastejando. Agosto de 2004.	145
ANEXO G – Aspecto das culturas de verão. Janeiro de 2003.	146
ANEXO H – Rendimentos de grãos de soja e milho nos anos anteriores de condução do experimento.	147
ANEXO I – Ganho de Peso Vivo nos anos anteriores de condução do experimento.	148
ANEXO J – Matéria Seca final das pastagens de inverno nos anos anteriores de condução do experimento.	149

SUMÁRIO

	Página
1. Introdução	20
2. Revisão de Literatura	22
2.1. Características Integração Lavoura-Pecuária no sul do Brasil e definição do problema de estudo	23
2.2. A Integração Lavoura-Pecuária no Sistema Plantio Direto	24
2.3. Dinâmica da Matéria Orgânica e Qualidade do Solo	29
2.3.1. Acúmulo de C na forma de MOS	30
2.3.2. Modelagem da dinâmica do C e N Orgânicos	33
2.3.3. Fracionamentos da MOS	37
2.3.4. Índice de Manejo de Carbono	41
2.3.5. Seqüestro de Carbono em ambientes agrícolas	42
2.4. Fertilidade do Solo e a Integração Lavoura-Pecuária	44
2.5. Hipóteses	45
2.6. Objetivos	45
3. Materiais e Métodos	47
3.1. Localização	47
3.2. Clima e Solo	47
3.3. Histórico de Área	48
3.4. Tratamentos e delineamento experimental	49
3.5. Manejo e condução do experimento	50
3.6. Ordenação teórica dos tratamentos quanto a qualidade do solo	52
3.7. Avaliações	54
3.7.1. Matéria seca das pastagens	54
3.7.2. Ganho de peso animal por área	54
3.7.3. Lotação animal	54
3.7.4. Matéria seca na maturação fisiológica do milho	55
3.7.5. Matéria seca no estágio R ₄ da soja	55
3.7.6. Rendimento de grãos de soja e milho	55

3.7.7. Adição de C pelos sistemas de culturas	55
3.7.8. Fertilidade do Solo	56
3.7.9. Matéria Orgânica do Solo	56
3.7.10. Densidade do Solo	57
3.7.11. Análise estatística	57
4. Resultados e Discussão	58
4.1. Desempenho das pastagens de inverno e ganho de peso animal	58
4.2. Rendimento de grãos de soja e milho	64
4.3. Adição de C ao solo pelas culturas de verão e inverno	67
4.4. Carbono Orgânico do Solo	69
4.4.1. Fracionamento e teores de CO no perfil do solo	69
4.4.2. Estoques de CO e sensibilidade das frações granulométricas	75
4.4.3. Índice de Manejo de Carbono	83
4.4.4. Modelagem do CO	84
4.4.4.1. Cálculo do coeficiente de humificação do C (k_1)	84
4.4.4.2. Cálculo do coeficiente k_2 , C_e , $t_{1/2}$ e C observado e estimado no último ano do experimento	88
4.4.4.3. Simulação matemática dos estoques de CO para 20 anos	91
4.4.4.4. Seqüestro ou Emissão ou CO ₂	100
4.4.4.5. Indicadores de QS e adequação ao modelo teórico proposto ...	102
4.5. Nitrogênio Total do Solo	104
4.5.1. Fracionamento e teores de NT no perfil do solo	104
4.5.2. Estoques de NT e sensibilidade das frações granulométricas	108
4.6. Fósforo e Potássio disponíveis	118
4.7. Correlação dos parâmetros avaliados	119
5. Conclusões	123
6. Referências Bibliográficas	124
7. Anexos	139

1. INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul é um estado com expressiva tradição no setor primário, tendo na bovinocultura de corte e nas culturas de grãos, e especialmente na soja, a base econômica estadual, com características de produção bastante semelhantes aos demais estados da região sul do Brasil. No entanto, até a década de 80, a bovinocultura e a produção de grãos se mantinham basicamente como atividades isoladas, predominando a criação de gado de corte na região sul-sudoeste e as atividades agrícolas na região norte-noroeste deste estado.

Porém, com a crescente pressão econômica e social pelo aumento dos índices de produtividade da pecuária de corte, até então tendo como base de produção o campo nativo, surgiu a necessidade de se ampliar a área de produção baseada em pastagens cultivadas de inverno. Por outro lado, a insustentabilidade agrônômica do sistema agrícola soja-trigo, aliada à baixa rentabilidade dos cereais de inverno, forçou o produtor de grãos a procurar alternativas para este período do ano, surgindo assim as condições necessárias para o crescimento de um sistema de exploração que integrasse estas duas atividades: a integração lavoura-pecuária.

Em 1996, no Censo Agropecuário realizado pelo IBGE, pela primeira vez a Integração Lavoura-Pecuária foi incluída como atividade econômica e já nesta época representava cerca de 16% da superfície agrícola do estado. Assim, com o advento do Sistema Plantio Direto, a melhoria dos índices de produtividade da pecuária de corte e o bom desempenho econômico da cultura da soja dos últimos anos, as últimas fronteiras existentes entre a região norte-nordeste, produtora de grãos, e a região sul-sudoeste, produtora de carne, desapareceram e a integração lavoura-pecuária é praticada em todo o estado, assim como no restante do país.

No entanto, apesar dos benefícios mútuos possíveis a partir da adoção deste sistema de exploração, a Integração Lavoura-Pecuária é um desafio técnico e necessita de um acerto bastante delicado para que se obtenha bons rendimentos com a pecuária sem prejudicar as culturas de grãos em sucessão. O sistema plantio direto exige um grande aporte de palha para ser estabelecido e manter-se produtivo a longo prazo e este fator pode ser conflitante com o pastoreio bovino no inverno, que limita a quantidade de biomassa para cobertura de solo e semeadura das lavouras de verão.

Assim, um ajuste entre pressão ou freqüência de utilização das pastagens de inverno e quantidade e qualidade de resíduo de cobertura de solo, seja ele proveniente das pastagens de inverno ou das culturas de verão, deve ser realizado para que o sistema não seja comprometido, mantendo-se produtivo ao longo dos anos e com melhoria dos níveis de fertilidade e qualidade do solo.

Portanto, ao avaliar diferentes métodos de utilização das pastagens de inverno: sem pastoreios ou com freqüências crescentes de pastoreios, e a utilização de monocultura ou rotação das culturas de verão de soja ou milho, pretende-se, selecionar as combinações de manejo que apresentem os melhores índices de produtividade animal e vegetal, além de entender a dinâmica da matéria orgânica e da fertilidade do solo nestes sistemas de exploração agrícola, tendo-os como indicadores da qualidade do manejo empregado e como estimativa da sustentabilidade destes sistemas de integração lavoura-pecuária estudados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O agronegócio vem sendo, desde o início desta década, o grande responsável pela manutenção do superávit da balança comercial brasileira, respondendo por 40,4 % do total das exportações nacionais no ano de 2004 (MAPA, 2004a). Grande parte deste bom desempenho econômico deve-se ao constante crescimento da produção de cereais, leguminosas e oleaginosas, que atingiram em 2003 o recorde de 123 milhões de toneladas de grãos produzidos, destacando-se especialmente a soja que atingiu no mesmo ano a marca de 51 milhões de toneladas de grãos (IBGE, 2004).

Os sucessivos recordes de produção devem-se principalmente ao aumento de produtividade das culturas, a saber que a área plantada com culturas de grãos manteve-se praticamente estável nos últimos anos, atingindo 47,3 milhões de hectares em 2004 (IBGE, 2004). Tal crescimento de produtividade pode ser em parte atribuído a adoção do Sistema Plantio Direto, o qual segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (2004), atingiu no biênio 2003/2004 a marca de 21,8 milhões de hectares cultivados sob este sistema, representando cerca de 46 % da área cultivada com culturas de grãos no Brasil.

No estado do Rio Grande do Sul, a área plantada com as culturas da soja e do milho, atinge aproximadamente 3,9 e 1,3 milhões de hectares, respectivamente, enquanto que as culturas de inverno, como o trigo e demais cereais ocupam pouco mais de 1,3 milhões de hectares (IBGE, 2004). Pode-se afirmar, portanto, que grande parte destas áreas não cultivadas com cereais de inverno são destinadas à atividade pecuária temporária durante os meses de inverno, constituindo-se áreas de integração lavoura-pecuária, ao saber que já em 1996, pelo Censo Agropecuário realizado pelo IBGE, as áreas sob exploração mista – agricultura e pecuária – abrangiam 16 % da superfície agrícola do estado, com aproximadamente 3,4 milhões de hectares (IBGE, 1996).

Por outro lado, o rebanho bovino brasileiro é hoje o maior rebanho comercial do mundo com aproximadamente 185 milhões de cabeças no ano de 2002, sendo que no Rio Grande do Sul tem-se mantido estável em torno de 14 milhões de animais (MAPA, 2004b). Porém com o forte avanço da lavoura de soja, que expandiu cerca de 20 % da sua área somente na safra 2002/2003 (Cassol, 2003), sobre áreas

anteriormente tradicionalmente utilizadas para a atividade pecuária sob campo nativo, nota-se a necessidade de se intensificar o sistema produtivo a fim de absorver a diminuição de áreas exclusivamente destinadas à pecuária e o conseqüente aumento da lotação animal sobre as áreas remanescentes e as exploradas a partir da integração com a agricultura.

Sendo assim, a integração lavoura-pecuária, como um sistema misto de produção deve ser estudado a fim de se maximizar a produtividade e a rentabilidade das atividades integradas, gerando, diversificando e desconcentrando a fonte de renda do produtor, além de tornar ou manter a atividade produtiva ao longo do tempo.

2.1. Características da Integração Lavoura-Pecuária no sul do Brasil e definição do problema de estudo

Apesar de pouco estudada, a integração lavoura-pecuária não é uma atividade propriamente nova no estado do Rio Grande do Sul, sendo utilizada há muitos anos tanto no restante do Brasil assim como em outros países. Em cada região pode-se citar características bastante particulares na adoção deste sistema. No centro-oeste brasileiro, por exemplo, predomina a utilização de pastagens tropicais, como as braquiárias, enquanto que no sul do Brasil, utilizam-se predominantemente, forrageiras subtropicais, como a aveia e o azevém, como base forrageira dos sistemas de integração lavoura-pecuária.

Moraes et al. (1998) definiu como Integração Lavoura-Pecuária a alternância temporária ou rotação do cultivo de grãos e pastejo de animais em pastagens de gramíneas e/ou leguminosas e seus consórcios que pode ser utilizada de maneiras distintas, segundo os interesses individuais.

Assim, a integração lavoura-pecuária realizada no sul do Brasil se caracteriza basicamente pela utilização de uma cultura anual de grãos no verão com o uso de uma pastagem de inverno composta normalmente de gramíneas durante os meses restantes. Normalmente, devido ao bom desempenho econômico nos últimos anos a soja é a principal cultura de verão utilizada e a aveia e o azevém são as forrageiras que predominantemente formam as pastagens de inverno.

As pastagens de inverno são manejadas em sua maioria sob sistema de pastoreio contínuo, com lotação variável de acordo com as condições de desenvolvimento da pastagem. Por outro lado, o produtor não realiza, normalmente, um ajuste de lotação conforme recomendado pela orientação técnica: ajustar a lotação animal em função da matéria seca disponível e da expectativa de crescimento da pastagem para um determinado período. Costumeiramente o produtor retira os animais ou parte deles da pastagem quando a mesma não mais tem condições de manter os animais ganhando peso devido a baixa disponibilidade de pasto e recoloca os animais quando a mesma se recupera ainda que parcialmente.

Além disto, é comum observar situações onde o produtor coloca os animais na pastagem quando a mesma ainda não possui condições de desenvolvimento ou de oferta de forragem suficiente para se manter produtiva ao longo de todo o período de pastoreio e retira os animais da pastagem excessivamente tarde quando já é época de implantar a cultura de verão subsequente.

As conseqüências da combinação da utilização de uma cultura de verão, como a soja, que promove pouco aporte de palha ao solo, com um sistema de pastoreio contínuo, com excesso de lotação e sobre-utilização da pastagem, são a diminuição da quantidade de palha para cobertura de solo e ciclagem de nutrientes, exposição do solo à erosão e à compactação, diminuição da infiltração e armazenamento d'água e redução dos teores de matéria orgânica do solo e estoque de nutrientes, reduzindo enfim a qualidade do sistema solo e comprometendo a sustentabilidade do sistema de produção.

2.2. A Integração Lavoura-Pecuária no Sistema Plantio Direto

A grande degradação dos solos agrícolas do sul do país nas décadas de 60, 70 e 80 provocada pelo rompimento do equilíbrio natural do solo quando este era incluído no sistema produtivo e exposto ao processo erosivo e oxidativo do sistema de preparo convencional, despertou a preocupação sobre a qualidade do solo e a sustentabilidade da exploração agrícola (Sanchez, 1976 e Lal & Pirce, 1991). Segundo Lal (1982), o surgimento de danos causados pela erosão em áreas

cultivadas não é nada mais que um sintoma de que para tal área e seu ecossistema foram empregados métodos de cultivo inadequados.

Neste contexto, o sistema plantio direto, foi introduzido no Brasil, no início da década de 70, como um método alternativo de preparo de solo com a finalidade específica de controlar a erosão do solo (Kochhann & Denardin, 2000). Segundo os mesmos autores, somente a partir da década de 80 é que a pesquisa produziu dados que levaram o sistema plantio direto a ser encarado não como apenas um método alternativo de preparo do solo mas como um sistema complexo e totalmente novo de produção agrícola, com alterações substanciais nos parâmetros químicos, físicos e biológicos de qualidade de solo e com grande impacto no rendimento das culturas.

Segundo Mielniczuk (1988), em regiões tropicais e sub-tropicais, onde os agentes climáticos atuam sobre a superfície do solo com grande intensidade, os sistemas agrícolas conservacionistas, como o sistema plantio direto, devem proporcionar boa cobertura de solo durante todo o ano, aporte contínuo e abundante de resíduos vegetais, utilizar num sistema de rotação plantas capazes de melhorar o balanço de nitrogênio do solo através da fixação biológica, utilizar rotação de culturas, incluindo-se culturas produtoras de grãos e forragem e utilizar o mínimo de revolvimento de solo possível.

Considerando que o aporte abundante e contínuo de resíduos vegetais é necessário ao sucesso do sistema plantio direto em conservar ou melhorar a qualidade do solo, a integração lavoura-pecuária aplicada sobre áreas em plantio direto pode parecer um contra-censo, visto que grande parte da forragem produzida no inverno, que poderia vir a servir de cobertura de solo, é ingerida pelos animais. Em alguns casos, onde o manejo das pastagens de inverno sob pastoreio não é bem realizado, pode-se inclusive reduzir-se o aporte de palhada pelas pastagens de inverno a quase zero, em condições de super-pastoreio ou de retirada muito tardia dos animais das pastagens. Assim, deve-se optar por sistemas de pastoreio menos agressivos, que proporcionem maiores taxas de crescimentos das pastagens, mantenham um resíduo mínimo de forragem durante todo o ciclo de pastoreio e promovam condições para que as áreas pastejadas possam se recuperar, acumular fitomassa e atingirem um nível de matéria seca que permita o retorno dos animais ao mesmo local sem reduzir expressivamente o resíduo de forragem. Além disto, um bom sistema de pastoreio deve permitir, ao final do ciclo de utilização das pastagens

pelos animais, um tempo suficiente para que as pastagens possam acumular fitomassa suficiente a fim de que sejam implantadas as culturas de verão sobre um bom nível de palhada e cobertura de solo.

Neste contexto, o sistema de pastoreio rotativo ou “Voisin” parece atender estas exigências. Neste sistema, a área de pastagem é dividida em parcelas menores ou “piquetes” nos quais os animais entram quando o mesmo apresenta uma quantidade de forragem suficiente para que seja realizado o pastoreio e saem quando o nível de forragem atinge um limite inferior pré-estabelecido, passando após para o próximo piquete ainda não pastejado. Desta maneira, os animais passam de piquete em piquete, até retornarem ao primeiro quando este apresentar novamente condições de ser pastejado (Voisin, 1974).

Segundo Primavesi et al. (2001), trabalhando com pastagens de aveia preta no estado de São Paulo, o momento de entrada dos animais nos piquetes para o primeiro ciclo de pastoreio deve ser quando 10 % das plantas estiverem “encanadas”, ou seja, quando 10 % das plantas apresentarem alongamento do colmo, com elevação do meristema apical. No Rio Grande do Sul, trabalhos com diversos cereais de inverno para duplo propósito, pastagens de aveia preta e azevém solteiras ou consorciadas com leguminosas de estação fria, avaliando o efeito de cortes simulando pastoreio bovino sobre a produção e qualidade de forragem e grãos, indicam que o primeiro corte ou primeiro ciclo de pastoreio deve ser realizado quando as pastagens atingirem cerca de 60 dias após a emergência (Fontaneli & Piovezan, 1991; Fontaneli et al., 1996; Gomes & Reis, 1999), 30 cm de altura (Del Luca et al., 1999) ou quando a pastagem atingisse 1,50 Mg ha⁻¹ de disponibilidade de matéria seca ou 30 cm de altura (Fontaneli & Freire Junior, 1991). Fontaneli et al. (2000a) trabalhando com integração lavoura-pecuária sob plantio direto e pastagens de aveia preta solteiras ou consorciadas, utilizou como indicador para o primeiro pastoreio a altura das plantas de aveia, realizando o primeiro pastoreio quando as mesmas atingiram 30 cm de altura.

Estes mesmos autores concordam que o resíduo mínimo das pastagens após a saída dos animais do piquete deve ser entre 5 – 7 cm (Fontaneli & Piovezan, 1991; Fontaneli & Freire Junior, 1991; Fontaneli et al., 1996; Gomes & Reis, 1999; Del Luca et al., 1999; Primavesi et al., 2001) e 7 – 10 cm de altura (Fontaneli et al., 2000a) a fim de preservar um mínimo de área foliar e não atingir os meristemas apicais das plantas pastejadas. Segundo Gardner & Wiggans (1960), plantas

pastejadas que não sofrem a remoção do meristema apical, apresentam rápido crescimento de novas folhas, devido a pronta disponibilidade de reservas de nutrientes armazenados nos entre-nós mais inferiores e na área foliar remanescente dos pastoreios. Segundo os mesmos autores, quando o primeiro pastoreio é realizado mais tardiamente ou deixando pouca ou nenhuma área foliar, ocorre a morte prematura das folhas basais com o avanço da maturidade das plantas.

O tempo de retorno dos animais ao mesmo piquete ou a frequência de pastoreio empregada também é de vital importância para o sucesso da integração lavoura-pecuária no sistema plantio direto. Tempos de retornos muito curtos podem reduzir a capacidade da planta de acumular fitomassa, diminuindo assim o ganho de peso dos animais, reduzindo o resíduo de forragem mínimo e como efeito cumulativo, reduzir o aporte final de palha ao sistema. Segundo Fontaneli & Freire Junior (1991) e Del Luca et al. (1999), o período de descanso entre cada ciclo de pastoreio deve permitir que as pastagens atinjam a mesma altura que determinou o início do primeiro pastoreio, no caso 30 cm. Já Fontaneli et al. (1996), Gomes & Reis (1999) e Primavesi et al. (2001) indicam tempos de retorno de 30, 28 e entre 28 e 35 dias, respectivamente. Ao final do período de pastoreio, Fontaneli et al. (2000a) indica um período de descanso das pastagens de aproximadamente 30 a 40 dias para que as mesmas acumulem pelo menos de 1,5 a 2,0 Mg ha⁻¹ de fitomassa, para serem após dessecadas e permitam a semeadura das culturas de verão.

A escolha das espécies que formarão as pastagens de inverno deve levar em conta aspectos como disponibilidade de sementes e adaptabilidade climática inerente a cada espécie de forrageira. No entanto, a opção pela formação de consórcios de forrageiras em vez de pastagens formadas de uma única espécie traz benefícios a todo o sistema de produção. Devido a diferenças de ciclo, a consorciação de uma ou mais espécies aumenta a estabilidade na produção e qualidade da forragem, maior produção de forragem e maior período de pastoreio e sustentam uma maior carga animal e mais estável durante a utilização da pastagem (Lupatini, 1998b). A aveia preta e o azevém são as principais espécies forrageiras utilizadas no sul do Brasil, porém a aveia preta concentra a sua produção de forragem sob pastoreio no outono e primeira metade do inverno, enquanto que o azevém concentra a sua produção de forragem na segunda metade do inverno e na primavera (Gomes & Reis, 1999), o que torna a combinação destas duas espécies adequada e desejável. Além dos aspectos já citados, o consórcio de forrageiras

permite que a espécie de ciclo mais tardio fique protegida enquanto a mesma ainda não atinge o desenvolvimento necessário para suportar o pastoreio bovino.

Do ponto de vista de rendimento zootécnico, a integração lavoura-pecuária apresenta bons resultados. Fontaneli et al. (2000a) obteve rendimentos médios de aproximadamente 300 kg ha⁻¹ de ganho de peso vivo bovino avaliando diferentes combinações de sistemas de culturas de verão e inverno. As observações foram realizadas durante seis anos, utilizando sistema de pastoreio rotativo, com frequência de pastoreio de aproximadamente 30 a 40 dias e dois a três ciclos de pastoreios por ano. Cassol (2003), trabalhando com integração lavoura-pecuária numa sucessão aveia+azevém/soja e comparando diferentes alturas de manejo das pastagens em sistema de pastoreio contínuo, obteve ganhos de peso vivo variando entre 550, 480, 300 e 180 kg ha⁻¹, aproximadamente, com alturas de manejo da pastagem de 5 – 10, 10 – 20, 20 – 30 e 30 – 40 cm, respectivamente. Restle et al. (1993) obtiveram ganhos de peso de 640 e 865 kg ha⁻¹ em 98 dias de pastoreio, ao utilizarem 150 e 300 kg ha⁻¹ de nitrogênio sobre pastagens de aveia preta e azevém.

Além dos reflexos sobre a produção de matéria seca das pastagens, tanto para alimentação animal, como para aporte de palha para cobertura de solo das pastagens de inverno, a integração lavoura-pecuária, realizada com sistemas de pastoreios mais intensivos no inverno, traz reflexos à produtividade das culturas de verão. Cassol (2003), observou redução significativa no rendimento de grãos de soja em sucessão a pastagem de aveia+azevém com a diminuição da altura de manejo da pastagem e aumento da carga animal aplicada sob pastoreio contínuo. Já Fontaneli et al. (2000a), não observou diferença significativa no rendimento de grãos de soja entre áreas que receberam pastoreio rotativo no inverno e áreas cultivadas com culturas de grãos de inverno anteriormente a soja. Tal fato indica que possivelmente o sistema de pastoreio rotativo seja mais indicado a ser adotado na integração lavoura-pecuária sob plantio direto.

No entanto, até o momento, há poucas informações que definam a frequência de pastoreio ou oferta ideal de forragem para áreas de integração lavoura-pecuária, apesar de existir um bom nível destas informações para a pecuária como atividade isolada das culturas de grãos. Além disto, mais estudos devem ser realizados a fim de determinar a quantidade mínima de fitomassa residual para cobertura de solo que deve permanecer após o período de pastoreio. Devido a esta redução natural do aporte de palha pelas pastagens de inverno, a opção por culturas de verão que

promovam grande aporte de resíduos vegetais após a colheita é uma boa alternativa. Neste caso, a cultura do milho em rotação com a soja pode aumentar consideravelmente a adição média anual de palha sobre o solo. A combinação de áreas submetidas a pastoreio bovino no inverno com diferentes culturas de verão também deve ser mais bem estudada para que seja possível planejarmos um sistema completo de rotação de culturas que se mantenha produtivo e rentável ao longo dos anos, mantendo ou melhorando a qualidade do solo.

2.3. Dinâmica da Matéria Orgânica e Qualidade do Solo

A preocupação com a sustentabilidade das atividades econômicas ligadas ao meio ambiente, como a agricultura e a pecuária, é crescente e está em evidência nos últimos anos. Num conceito mais amplo, Brown (1981) afirmou que “Uma sociedade sustentável é aquela que satisfaz suas necessidades sem diminuir as perspectivas das gerações futuras”. Neste contexto, Moser (2005) afirma que a atividade agropecuária deve basear-se no seguinte paradigma ecológico: ser produtivamente eficiente, economicamente viável, responsável socialmente e ecologicamente compatível com o ambiente. Portanto, podemos incluir num conceito de sustentabilidade dirigida à atividade agropecuária aspectos como rentabilidade econômica, produtividade, relações entre custo e benefício e conceitos ligados a preservação ambiental como poluição e qualidade do solo (QS).

A QS pode ser incluída com um dos principais fatores que definem a sustentabilidade de um sistema de exploração agropecuário. Doran & Parkin (1994) definiram QS como sendo a capacidade do solo em manter a produtividade biológica, a qualidade ambiental e promover a vida vegetal e animal saudável na face da Terra. Para Vezzani (2001), o solo, como sistema aberto não atinge qualidade por si só num sistema de exploração agrícola, mas sim pela eficiência do funcionamento do sistema solo-planta-microorganismos. Assim, o manejo do solo é um dos principais fatores que definem a qualidade do solo e a sustentabilidade de um sistema de produção. No entanto, para avaliar a QS é necessário que se eleja algumas propriedades do solo a serem monitoradas como atributos indicadores. Para uma propriedade ser um eficiente indicador de QS é necessário que este seja sensível às variações do manejo e bem correlacionado com as funções

desempenhadas pelo solo (Doran & Zeiss, 2000). Segundo Islam & Weil (2000), os possíveis indicadores de QS podem ser distintos em três grupos, a saber: 1) efêmeros, cujas alterações se dão rapidamente no tempo segundo o manejo, entre eles: pH, disponibilidade de nutrientes, densidade, porosidade e umidade do solo; 2) intermediários, possuindo forte influência nos processos que ocorrem no solo, tais como: matéria orgânica do solo, agregação e biomassa microbiana; e 3) permanentes, que são inerentes ao solo, como: profundidade, textura e mineralogia. Dentre estes, os indicadores do grupo intermediário são os mais aptos a serem utilizados como ferramentas de monitoramento da QS.

Definidos os indicadores, pode-se avaliar o atual estado de QS medindo e comparando estes atributos com os valores encontrados no solo sob estado natural ou com valores considerados ideais (Doran & Parkin, 1994; Sarrantonio et al., 1996). A MOS possui potencial para ser utilizada como atributo chave da QS (Doran & Parkin, 1994; Mielniczuk, 1999), pois além de satisfazer o requisito básico de ser sensível às modificações pelo manejo do solo, é ainda fonte primária de nutrientes às plantas, influenciando na infiltração, retenção de água e susceptibilidade à erosão (Gregorich et al. 1994). Ela também atua sobre outros atributos como ciclagem de nutrientes, complexação de elementos tóxicos e estruturação do solo. Solos tropicais, intensamente intemperizados, possuem como uma das suas principais características químicas a baixa CTC. Nesses solos, o teor de MOS tem importância preponderante na CTC efetiva (Bayer & Mielniczuk, 1999). Portanto, a dinâmica da MOS tem importância chave no entendimento das alterações provocadas pelo manejo que se aplica ao solo sobre a QS e na sustentabilidade produtiva e econômica de um sistema de exploração agrícola.

2.3.1. Acúmulo de C na forma de MOS

Numa situação estável, normalmente em solos sob vegetação nativa inalterada, os teores de MOS se mantêm estáveis no tempo, a medida que as adições de C orgânico via resíduos de vegetais e a sua conversão em MOS são da mesma magnitude que as perdas de C orgânico pela mineralização da MOS promovidas pela atividade microbiana (Sanchez, 1976).

Quando o solo passa a ser cultivado, as taxas de acúmulo ou perdas de MOS variam de acordo com as características de cada tipo de solo, dos sistemas de culturas, do sistema de preparo do solo e das condições climáticas, que aceleram ou retardam os processos de decomposição dos resíduos e de síntese e decomposição da MOS (Sanchez, 1976).

As taxas de ganhos ou perdas de CO são definidas, portanto com a relação entre adições de C por resíduos animais ou vegetais e perdas de C por mineralização da MOS (Bayer & Mielniczuk, 1997). No entanto, o solo é um reservatório com limites definidos e apresenta capacidade limitada em acumular C na forma de MOS. Bayer (1996) observou a existência de uma relação direta entre os teores de argila de um solo e os conteúdos de MOS, o que indica que solos argilosos apresentam maior capacidade de acumular carbono.

Mielniczuk (1999) apresentando dados adaptados de Duxbury et al., (1989), definiu a distribuição dos compartimentos de carbono num sistema agrícola em quatro grupos distintos: 1) biomassa vegetal viva, 2) resíduos vegetais, raízes e exudatos, 3) MO não protegida e 4) MO protegida. Os compartimentos referentes a biomassa viva, resíduos vegetais, raízes e exudatos têm um tempo de residência de aproximadamente $\frac{1}{4}$ de ano e atuam protegendo o solo contra a erosão, na reciclagem de nutrientes e como fonte de alimento para a atividade biológica. O compartimento referente a MO não protegida pode ser dividido em dois sub-grupos, sendo um deles referente à biomassa microbiana do solo, com tempo de residência igualmente curto e atuando na decomposição de resíduos vegetais, agregação temporária e como fontes de nutrientes. O segundo grupo deste compartimento refere-se a MOS lábil, com tempo de residência de 2 a 5 anos e atua como agente de agregação temporária, fonte de nutrientes às plantas, fonte de energia aos microorganismos e influenciando a CTC do solo. O último compartimento também se subdivide em dois grupos, a saber: MOS protegida estruturalmente e MOS protegida por colóides. Ambos os grupos atuam como agentes de agregação permanente e na CTC do solo e possuem tempo de residência estimado em 1000 anos.

Numa abordagem mais simplificada à MOS afirma-se que esta engloba resíduos vegetais em avançado estágio de decomposição, a biomassa microbiana, raízes e a fração mais estável, denominada húmus (Camargo et al., 1999). Assim, podemos inferir que o C presente nestas frações não se mineraliza ou se estabiliza na mesma velocidade. Assim, aceita-se que os resíduos vegetais são decompostos

gradualmente formando moléculas cada vez mais estáveis, através de uma variedade de processos físicos, químicos, microbianos e relativos à fauna edáfica do solo. De acordo com Sollins et al., (1996), a estabilização significa um decréscimo do potencial para perda de matéria orgânica do solo por respiração, erosão ou lixiviação. Neste caso há uma produção de material que resiste a transformação posterior. A estabilização poderia começar antes dos tecidos das plantas alcançarem o solo, ou mesmo antes deles morrerem.

No entanto, os mecanismos de estabilização da MO no solo podem ser classificados em recalcitrância bioquímica, estabilização química e proteção física (Christensen, 1996). A recalcitrância bioquímica ocorre devido às características químicas próprias do substrato, que devido a complexidade de suas moléculas em um estado mais avançado de decomposição, tornam mais lenta ou impedem o processo de decomposição. Stout et al. (1985) e Preston (1996) associaram a maior recalcitrância da MOS à maior presença de grupamentos químicos aromáticos nas moléculas constituintes da MOS em estágio mais avançado de humificação. A estabilização química ou interações físico-químicas, refere-se às interações entre moléculas orgânicas e entre moléculas orgânicas e minerais, formando associações químicas ou físico-químicas que limitam a decomposição destes materiais. A proteção física ou acessibilidade dos compostos orgânicos é determinada principalmente pela estrutura do solo, através do controle do acesso microbiano aos substratos.

Sollins et al. (1996) definem nestes termos: “a recalcitrância compreende características a nível celular de substâncias orgânicas, incluindo composição elementar, presença de grupos funcionais e conformação molecular, que influencia sua degradação por micróbios e enzimas. Interações refere-se às interações intermoleculares entre substâncias orgânicas e outras inorgânicas, ou outras substâncias que alteram a taxa de degradação destes compostos orgânicos ou a síntese de novos compostos orgânicos. Acessibilidade refere-se a localização (posição) de substâncias orgânicas com respeito aos micróbios e enzimas”.

A estabilização da MOS através de interações físico-químicas pode exercer um papel mais importante em solos de clima tropical do que em solos de clima temperado (Nayak et al, 1990). A interação de compostos orgânicos com as argilas ou sesquióxidos do solo formam complexos de solubilidade extremamente baixa, o que torna quase impossível a utilização deste substrato pelos microorganismos

(Zech et al., 1997). A partir disto, Christensen (1996) dividiu os complexos organominerais em associações primárias ou secundárias. Os complexos primários são aqueles encontrados na estrutura primária do solo após a sua dispersão. Os complexos secundários são constituídos de agregados de complexos primários, formando a estrutura secundária do solo. Jastrow & Miller (1997) também consideraram a existência de associações organominerais secundárias formando macroagregados, sendo que estas associações organominerais promovem a estabilização dos agregados e da MOS.

Jastrow & Miller (1997) e Pillon (2000) delegam a dificuldade de acesso dos microorganismos aos compostos orgânicos o principal efeito no tempo de residência do C no solo, em detrimento da influência exercida pelo grau de aromaticidade das moléculas protegidas que contém o CO. No entanto, sabe-se que o solo emite constantemente CO₂ para a atmosfera devido aos processos de respiração celular dos microorganismos e devido a decomposição da MOS. Assim, o aumento ou redução dos estoques de CO no solo define-se quanto ao grau de exposição do solo aos fatores que favorecem as perdas de CO – revolvimento, ruptura de agregados, erosão, lixiviação, baixa adição de resíduos – ou aos fatores que favorecem o aumento dos estoques de CO – alta adição de resíduos, não revolvimento, aumento da estabilidade de agregados, proteção do solo contra a erosão.

2.3.2. Modelagem da dinâmica do Carbono Orgânico e Nitrogênio Total

O monitoramento dos teores de Carbono Orgânico (CO) e Nitrogênio Total (NT) tem sido tema de vários trabalhos que versam sobre a dinâmica da MOS e QS (Bayer, 1996; Amado et al., 2001; Lovato, 2001). Os estoques de C e N de um solo dependem da quantidade de resíduos aportados anualmente, da taxa de conversão destes resíduos em MOS e da taxa de mineralização da MOS. Hénin & Dupuis (1945) desenvolveram um modelo matemático a fim de explicar as variações no estoques de C no solo ao longo do tempo:

$$C_t = C_0 e^{-k_2 t} + A k_1 / k_2 (1 - e^{-k_2 t}) \quad (1)$$

Este modelo unicompartmental expressa a quantidade de carbono no solo (C_t), num tempo t , onde C_0 = estoque original de carbono no solo, A = adição anual de resíduos, k_1 = taxa de conversão dos resíduos em MOS (coeficiente isohúmico), k_2 = taxa de mineralização da MOS e e = logaritmo natural neperiano.

Ao derivarmos esta função, obtemos:

$$dC / dt = k_1 A - k_2 C \quad (2)$$

Com esta nova função podemos calcular a variação do estoque de carbono do solo num dado período de tempo, que normalmente se considera de um ano.

Tomando como base sistemas agrícolas que mantém constante o teor de carbono no solo (C_e), ou seja, $dC / dt = \text{zero}$, e conhecendo-se $k_1 A$, pode-se calcular a taxa de mineralização da MOS (k_2) pela equação a seguir:

$$k_2 = k_1 A / C_e \quad (3)$$

Alternando os termos da mesma equação, podemos calcular o teor de carbono no solo quando este atinge a estabilidade (C_e):

$$C_e = k_1 A / k_2 \quad (4)$$

O tempo necessário para que ocorra a metade da diferença entre C_0 e C_e , denominado $t_{1/2}$, é determinado pela seguinte equação:

$$t_{1/2} = \ln(2) / k_2 \quad (5)$$

O tempo médio de permanência do CO no solo, denominado **TMP**, é definido pela seguinte equação:

$$TMP = 1 / k_2 \quad (6)$$

Estas equações podem ser utilizadas da mesma maneira para explicar a dinâmica dos estoques de nitrogênio do solo (Woodruff, 1949).

Do ponto de vista prático, o manejo do solo e a prática de sucessão ou rotação de culturas afetam basicamente os coeficientes k_2 e A do modelo matemático.

O parâmetro A do modelo matemático representa a produção de fitomassa de cada sistema de sucessão ou rotação de culturas empregado. Sistemas que incluem na sua composição plantas com grande produção de fitomassa, como o milho, terão adições anuais de C ao solo mais significativas do que sistemas onde predominem plantas de baixa produção de fitomassa, como a soja. Assim, num contexto de integração lavoura-pecuária, sistemas de pastoreios mais intensivos terão, em contrapartida, menores adições anuais de C ao solo, enquanto que sistemas de pastoreios mais equilibrados ou sem pastoreio terão maiores adições de C ao solo. Mielniczuk et al. (2003) trabalhando com dados de Lovato (2001) estimaram que a adição anual de C pelos sistemas de culturas no sistema plantio direto necessária para manter constantes os estoques de CO do solo deve ser de $4,40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, de maneira que adições maiores de C resultariam em um aumento dos teores de CO, enquanto que adições menores promoveriam o decréscimo dos estoques de CO.

Geralmente, os coeficientes k_1 e k_2 são calculados a partir de técnicas isotópicas de C marcado (^{14}C) ou a abundância natural do ^{13}C (Cerri, 1986; Gregorich et al., 1995). No entanto estes parâmetros também podem ser determinados, com relativa precisão, em experimentos de longa duração, com valores de A e C_o conhecidos (Mielniczuk et al., 2003).

O parâmetro k_1 , que representa a taxa de conversão dos resíduos em MOS varia de acordo com o clima local e é calculado a partir dos coeficientes das equações lineares que correlacionam as quantidades anuais de C adicionado (A) e a variação dos estoques de C no solo em relação ao estoque original de C no solo (Mielniczuk et al., 2003). Apesar de Sanchez (1976) afirmar que os valores de k_1 serem semelhantes em diferentes ambientes e condições climáticas, a ciclagem mais lenta da matéria orgânica particulada em regiões temperadas e frias (Gregorich et al., 1995) deve determinar um coeficiente de humificação (k_1) superior aos verificados em regiões de clima tropical ou subtropical (Feller & Beare, 1997). Paustian et al. (1992) obteve valores de k_1 de $0,226 \text{ ano}^{-1}$, trabalhando com sistema de revolvimento manual do solo na Suécia, enquanto Mielniczuk et al. (2003)

trabalhando com dados adaptados de Lovato (2001) observou valores mais baixos ($k_1 = 0,121 \text{ ano}^{-1}$), numa região de clima subtropical. Estes valores encontram-se dentro da faixa normal de valores de k_1 (0,077 a $0,23 \text{ ano}^{-1}$) sugeridos por Bolinder et al. (1999) e Gregorich et al. (1995).

Os métodos de preparo do solo, como preparo convencional, reduzido ou plantio direto, afetam principalmente o parâmetro k_2 . No entanto, este parâmetro também é afetado pela textura do solo, sendo que as taxas de mineralização da MOS são menores em solos argilosos do que em solos arenosos (Dalal & Mayer, 1986a), visto que a proteção física do C orgânico por microagregados não é afetada expressivamente pelos métodos de preparo em solos com maiores conteúdos de argila (Bayer, 1996). Métodos de preparo mais agressivos, com maior intensidade de revolvimento, como o convencional, expõem o solo ao processo oxidativo de mineralização da MOS, pela redução dos mecanismos de proteção física da MOS, como a agregação, aumentando o coeficiente de mineralização e assim as perdas de MOS. Lovato (2001) estimou um k_2 de $0,0494 \text{ ano}^{-1}$ para o sistema de preparo convencional, $0,0395 \text{ ano}^{-1}$ para preparo reduzido e $0,0270 \text{ ano}^{-1}$ para o sistema plantio direto, trabalhando com um Argissolo Vermelho distrófico, valores bastante próximos aos observados por Bayer (1996) e Bayer et al. (2001b) em trabalhos anteriores do mesmo experimento. Mielniczuk et al. (2003) rediscutindo dados de Lovato (2001), estimou um k_2 de $0,0170 \text{ ano}^{-1}$ para o sistema plantio direto. Segundo o autor, a diferença entre os resultados deve-se ao fato de que Lovato (2001) utilizou um coeficiente k_1 fixo de $0,20 \text{ ano}^{-1}$, obtido de Cerri (1986) ao trabalhar com uma área de cana-de-açúcar sobre um Latossolo Vermelho do estado de São Paulo, uma região de clima tropical. Este valor seria, então, muito alto para regiões de clima subtropical, como a qual se refere o trabalho do autor.

Aplicando-se o modelo matemático para a modelagem do NT do solo devemos considerar as particularidade de cada parâmetro do modelo para explicar a dinâmica do N no solo. Para compor o parâmetro **A**, devemos considerar as fontes de entrada de nitrogênio no sistema de culturas, sendo elas: adubação mineral, fixação biológica de nitrogênio na presença de leguminosas e ciclagem de nitrogênio do solo absorvido pelos vegetais em crescimento e liberado durante sua decomposição. A presença de leguminosas ou da adubação nitrogenada no sistema de culturas promove o aumento das adições de C e N e acúmulos destes elementos no solo (Lovato, 2001).

O coeficiente k_1 aplicado à modelagem do NT irá expressar a proporção do N aportado ao solo que se converte em N da MOS. Lovato (2001) utilizou em seus trabalhos um coeficiente k_1 fixo ($k_1=1,0$), considerando que cada unidade de N adicionada ao solo era convertido totalmente em NT. No entanto, utilizando-se da mesma ferramenta de cálculo utilizada para determinar o coeficiente k_1 para C, através da interpolação das quantidades de N adicionadas nos sistemas de culturas e as variações nos estoques de N do solo, pode-se ter uma medida mais aproximada do coeficiente k_1 para a modelagem do NT.

O coeficiente k_2 quando utilizado na modelagem do NT representa a taxa de mineralização do NT contido na MOS. Bayer (1996) considerou a taxa de mineralização da MOS (k_2) como semelhante para a modelagem do CO e de NT. No entanto, Lovato (2001) observou alterações no coeficiente k_2 para a modelagem do NT em função da presença de leguminosas nos sistemas de culturas ou de adubação nitrogenada, sendo que nos sistemas que não possuíam adubação nitrogenada ou presença de leguminosas, a taxa de mineralização do CO foi maior do que a taxa de mineralização do NT, enquanto que nos sistemas com presença de leguminosas ou de adubação nitrogenada, o coeficiente k_2 do NT foi maior do que o do CO, indicando maior taxa de mineralização do nitrogênio nestes sistemas.

O conhecimento destes parâmetros e a modelagem da MOS visa, portanto, o desenvolvimento de sistemas de exploração agropecuária mais eficientes, com potencial em aumentar os estoques de carbono e nitrogênio no solo, proporcionando maior disponibilidade de nutrientes às plantas, melhoria da qualidade do solo e colaborando para o seqüestro de carbono atmosférico e mitigação do efeito estufa.

2.3.3. Fracionamento da MOS

Normalmente, as avaliações dos estoques de Carbono Orgânico Total (COT) ou Nitrogênio Total (NT) são suficientes para entendermos a dinâmica da MOS num sistema de exploração agrícola. No entanto, em situações de curtos períodos de histórico de manejo, as variações nos conteúdos de COT ou NT não são suficientemente grandes para que possamos diferenciar os tipos de manejo aplicados ao solo. Neste sentido, o fracionamento da MOS em seus compartimentos

pode ser uma alternativa para incremento de sensibilidade (Bayer et al., 2001a, 2001b, 2002, 2004; Conceição et al., 2005).

Considerando os compartimentos do carbono num ambiente agrícola apresentados por Mielniczuk (1999) e detendo nossa atenção aos compartimentos da MOS: MO lábil, MO protegida estruturalmente e por colóides, podemos considerar alguns métodos de fracionamento da MOS para melhor entendimento da natureza, distribuição, tempo de residência, funções e sensibilidade de cada fração em indicar a qualidade do manejo empregado. Podemos definir a MO lábil, como sendo resíduos de plantas e da fauna edáfica do solo em diversos estados de decomposição e com grande diversidade de substratos, desde os mais prontamente decomponíveis até as mais complexas e resistentes moléculas. Assim, a MOS lábil é um compartimento transitório da MOS, entre os resíduos de plantas recém depositados sobre o solo e o CO mais humificado e estabilizado no compartimento da MO protegida (Gregorich & Janzen, 1995).

Basicamente, os métodos de fracionamento da MOS podem ser classificados como métodos granulométricos (Cambardella & Elliott, 1992), densimétricos (Golchin et al., 1994) ou uma mistura de ambos (Six et al., 1998). Os métodos densimétricos baseiam seu funcionamento na separação dos compartimentos da MO através de um líquido denso. Assim, a fração mais pesada que o líquido – que normalmente apresenta densidade de aproximadamente $2,0 \text{ g cm}^{-3}$ – é denominada fração pesada e a fração mais leve é denominada fração leve (Gregorich & Janzen, 1995). Os métodos granulométricos de fracionamento têm como princípio a separação da MO por peneiramento. Assim, os trabalhos de pesquisa que utilizam este método de fracionamento (Cambardella & Elliott, 1992; Bayer et al., 2001a; 2001b, 2002, 2004; Conceição et al., 2005; Diekow, 2003) adotam a separação dos compartimentos da MOS em Carbono Orgânico Particulado (CO_p), Carbono Orgânico associado a minerais (CO_{am}) e Carbono Orgânico Total (COT).

O CO_p é a fração da MOS separada por dispersão e peneiramento do solo associada a fração areia (CO_p > 53 µm). Golchin et al. (1994) caracterizaram o CO_p como sendo partículas derivadas de resíduos de plantas e hifas com estrutura celulares reconhecíveis, cuja permanência do solo está condicionada a proteção física desempenhada por agregados. O CO_{am} é a fração da MOS associada as frações silte e argila do solo (CO_{am} < 53 µm). Christensen (1996) definiu o CO_{am}

como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, estando protegida através do mecanismo de proteção coloidal.

Cambardella & Elliott (1992) e Chan (1997) observaram que a COp era a fração preferencialmente perdida quando solos sob pastagens naturais eram convertidos em lavouras sob cultivo convencional. No mesmo estudo, Chan (1997) observou que a disponibilidade de nitrogênio estava altamente correlacionada com os estoques de C da fração particulada da MOS. Chan et al. (2002) observou que após 19 anos de cultivo, o preparo convencional do solo induziu perdas de C no solo, sendo que 80 % do C perdido era proveniente da fração particulada da MOS. A maior sensibilidade da MOp também é descrita por Mrabet et al. (2001), ao observar um incremento de 75 % e 25 % dos estoques de C da fração particulada e COT, respectivamente, após 11 anos da adoção do sistema plantio direto em áreas anteriormente cultivadas sobre preparo convencional. Da mesma forma Franzluebbbers et al. (2000) observaram maior sensibilidade da COp em função do manejo adotado em experimento de longa duração envolvendo pastoreio bovino, cortes de forragem para fenação e sistemas de preparo do solo convencional e sem preparo.

Os estoques de Carbono Orgânico e Nitrogênio Total da fração particulada (COp e NTp) são dependentes das adições de C e N via resíduos vegetais (Pillon, 2000; Bayer et al., 2001a) e da proteção física exercida pelos agregados (Christensen, 1996). Devido a alta dependência do aporte de C via resíduos vegetais para a manutenção desta fração da MOS, encontra-se uma grande variação dos estoques de COp no perfil do solo. Bayer et al. (2001a, 2004) e Diekow (2003) observaram grande redução dos estoques de COp com o aprofundamento no perfil do solo, variando de 6 até 34 % de participação da COp nos estoques de MOS na camada 0 – 2,5 cm do solo e variando de 3 a 16 % na camada 2,5 – 7,5 cm de profundidade, o que demonstra a dependência da fração da constante adição de resíduos vegetais. A proteção física ao COp normalmente é exercida pelos macroagregados (Tisdall & Oades, 1982; Golchin et al., 1997), portanto, no sistema plantio direto, a maior preservação dos agregados do solo pelo não revolvimento é indicativo de maior acúmulo de COp do que em sistemas de preparo convencional (Bayer et al., 2004). Além da agregação, a textura do solo influencia a capacidade

do solo em proteger a COp, sendo esta capacidade maior em solos argilosos do que em solos arenosos (Golchin et al., 1994).

Em contrapartida, os estoques de Carbono Orgânico e Nitrogênio Total da fração associada a minerais (COam e NTam), são dependentes da transferência de C e N da fração particulada e do grau de proteção coloidal exercida pelas superfícies minerais (Christensen, 1996). Quanto maior o tempo de residência da COp no interior dos agregados, maior a probabilidade de que este C e N presentes na fração particulada venha a ser incorporado à fração associada a minerais (Jastrow, 1996). Os estoques de COam são menos sensíveis a alterações provocadas pelo manejo do solo do que os estoques de COp (Bayer et al., 2001a, Conceição et al., 2005). Bayer et al. (2001a) observou variações de 245 e 285 % dos estoques de COp e NTp, contra apenas 68 e 76 % de COam e NTam, respectivamente, ao comparar o efeito de 12 anos de cultivo de milho e feijão-de-porco com 12 anos de solo descoberto. Em curtos períodos, a COam não apresenta alterações dos seus estoques sobre diferentes sistemas de manejo. Isto deve-se ao fato de que o COam possuir uma ciclagem bem mais lenta que a fração particulada da MOS (Bayer et al., 2004) devido ao seu avançado estágio de humificação e estabilidade conferida pela interação com a fração mineral do solo, localização no interior de microagregados e maior recalcitrância química devido a sua composição (Bayer, 1996).

Dalal & Mayer (1986b) também consideram possível aplicação do modelo matemático exposto pela fórmula 1, citada anteriormente, para a modelagem da dinâmica dos estoques de C e N do solo para cada fração da MOS. Assim, devido as características de cada fração da MOS expostas anteriormente, é passível esperarmos encontrar diferenças nos valores dos coeficientes k_1 e k_2 para cada fração da MOp, assim como para os demais parâmetros de modelagem do C e N orgânico, como o $t_{1/2}$. Dalal & Mayer (1986b) observaram valores de coeficientes k_2 bastante superiores na fração areia do solo em relação os valores de k_2 da fração silte, argila ou relativos a todo o solo. A aplicação deste modelo matemático em cada fração da MOS consistiria em maior entendimento das alterações provocadas pelo manejo aplicado ao solo sobre a dinâmica da MOS.

2.3.4. Índice de Manejo de Carbono

Apesar da MOS ser um excelente indicador de qualidade do solo, a simples medição dos estoques de carbono total ou de suas frações e a comparação com as condições do solo no seu estado original, não nos dão valores capazes de serem extrapolados para situações de manejo diferentes das avaliadas, em diferentes locais, climas e solos. Neste sentido, Blair et al. (1995) desenvolveram o Índice de Manejo de Carbono (IMC) que vem a ser uma medida relativa das alterações provocadas pelo manejo ao solo, comparando-o com uma situação considerada original ou ideal. O IMC mede as alterações nos estoques de COT e leva em consideração aspectos da labilidade do CO do solo.

Pelo método original, os autores consideraram como fração lábil da MOS aquela que é oxidada ao ataque de KmnO_4 333 mmol L^{-1} . No entanto, Diekow (2003) demonstrou ser possível a utilização dos estoque de MOp para o cálculo do IMC, considerando que a fração particulada da MOS fosse proporcional a fração lábil.

Assim, o cálculo do “IMC” segue a seguinte fórmula:

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{IL} \times 100 \quad (7)$$

onde, IEC = índice de estoque de carbono e IL = índice de labilidade.

O “IEC” é calculado pela fórmula a seguir:

$$\text{IEC} = \text{C}_t \text{ tratamento} / \text{C}_t \text{ referência} \quad (8)$$

onde, C_t tratamento = estoque de COT no tratamento avaliado, C_t referência = estoque de COT num tratamento de referência, normalmente no solo sobre vegetação nativa.

O “IL” é calculado da seguinte maneira:

$$\text{IL} = \text{L tratamento} / \text{L referência} \quad (9)$$

onde, L tratamento = labilidade da MOS no tratamento avaliado, L referência = labilidade da MOS no tratamento de referência.

O “L” é calculado pela fórmula a seguir:

$$L = COp / COam \quad (10)$$

onde, COp = estoque de CO na fração particulada da MOS, COam = estoque de CO na fração associada a minerais da MOS.

Diekow (2003) encontrou IMC crescentes em função do aumento do aporte de C e N por resíduos vegetais e adubação mineral nitrogenada, enquanto que áreas mantidas com solo descoberto tiveram os piores índices.

O IMC parece ser uma ferramenta útil em indicar os melhores sistemas de manejos de solos e culturas, por integrar numa mesma medida as variações ocorridas nas diferentes frações da MOS.

2.3.5. Seqüestro de Carbono em ambientes agrícolas

A atividade antrópica pós revolução industrial levou a um aumento das concentrações dos gases do efeito estufa na atmosfera. Segundo o IPCC (2001), as concentrações de gás carbônico, metano e óxido nitroso na atmosfera subiram de 280 ppm, 700 e 270 ppb, respectivamente, no período entre os anos 1000 e 1750, para 368 ppm, 1750 e 316 ppb no ano 2000. Segundo o mesmo estudo, tais incrementos nas concentrações dos gases do efeito estufa levaram a um aumento da temperatura média terrestre da ordem de 0,6 °C durante o século XX e a uma taxa anual de elevação do nível do mar de aproximadamente um a dois milímetros por ano no mesmo período. Pelo atual nível de emissões e concentrações destes gases na atmosfera, os modelos matemáticos que simulam as possíveis modificações no clima terrestre prevêem que mesmo que as emissões se estabilizem em uma fração das atuais emissões, os níveis de CO₂ na atmosfera continuarão crescendo por até 300 anos antes de se estabilizarem. Segundo o mesmo modelo, as temperaturas médias terrestres também continuarão aumentando por alguns séculos até estabilizarem e o efeito sobre o aumento do nível dos oceanos ainda se refletirá por mais de 1000 anos. Tais projeções justificam

a preocupação e o interesse da comunidade científica sobre o assunto e especialmente sobre estratégias de seqüestro de carbono da atmosfera.

Conceitualmente pode-se definir seqüestro de carbono em sistemas agrícolas como sendo a incorporação do carbono fotossintetizado por vegetais ao solo na forma de MOS. Bruce et al. (1998) afirmaram que para que o solo atue como dreno de C atmosférico é necessário a implementação de medidas integradas, sendo elas: redução ou eliminação da intensidade de preparo do solo, intensificação de sistemas de rotação de culturas, adoção de práticas que promovam o aumento da produtividade das culturas e restabelecimento de cobertura vegetal permanente.

Amado et al. (2001) observou que a transição de um sistema de preparo convencional para o sistema plantio direto, com um sistema de culturas envolvendo Milho e Mucuna, após oito anos de cultivo, obteve um saldo líquido de seqüestro de CO₂ de 15,5 Mg ha⁻¹ no sul do Brasil. Lovato (2001) encontrou taxa de seqüestro de CO₂ atmosférico de 2,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, totalizando um seqüestro líquido de 26,02 Mg ha⁻¹ num sistema de culturas aveia+vica/milho+caupi sob plantio direto após 13 anos de cultivo. Bapst et al. (2005) observou taxas de seqüestro de C superiores a 1,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em solos cultivados no sistema plantio direto no sul do estado de Ohio, Estados Unidos da América. Segundo o autor, estas taxas de seqüestro seriam superiores inclusive às taxas de enriquecimento de C no solo de áreas reflorestadas na mesma região. Sá et al. (2001) observaram taxas de seqüestro de C semelhantes no estado do Paraná, com taxas de acúmulo de C no MOS de 0,88 a 0,99 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

No entanto, pelos dados de Lovato et al. (2004) a adição mínima de C via resíduos de plantas no sistema plantio direto deve ser de 4,2 Mg ha⁻¹ para as condições climáticas do Rio Grande do Sul, enquanto que para as mesmas condições áreas sob preparo convencional necessitariam um aporte anual de resíduos da ordem de 8,9 Mg ha⁻¹, sendo que com adições inferiores, ocorre emissão de CO₂ para atmosfera, ao considerarmos o balanço entre ganhos de CO no solo pela decomposição dos resíduos vegetais e perdas de CO pela mineralização da MOS.

Portanto, o balanço do C nos sistemas agrícolas deve ser melhor estudado a fim de ser possível definirmos as potencialidades de seqüestro de gás carbônico atmosférico em cada sistema de manejo do solo e o seu impacto na mitigação dos problemas causados pelo efeito estufa.

2.4. Fertilidade do Solo e a Integração Lavoura-Pecuária

Uma prática comum em áreas de integração lavoura-pecuária é o aproveitamento do efeito residual da adubação realizada sobre as culturas de verão para as pastagens de inverno. Sendo assim, normalmente, o produtor realiza a adubação fosfatada e potássica apenas na implantação das culturas de verão. Quando a cultura de verão é a soja, não se utiliza adubação nitrogenada, devido a fixação biológica de nitrogênio em simbiose com *Rhizobium*, promovida por esta cultura, e quando a cultura de verão é o milho, a adubação nitrogenada ocorre em cobertura durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Apesar de bons resultados serem obtidos desta maneira, ao longo dos anos pode ocorrer diminuição da disponibilidade de nutrientes no solo devido a exportação de nutrientes promovida pelas culturas de verão e pela forragem consumida no inverno pelos animais em pastoreio.

Fontaneli et al. (2000b) observou redução nos teores de P e K extraíveis do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária com pastagens de inverno em relação a sistemas que mantinham apenas culturas de grãos. Os autores atribuíram este fato a extração e exportação de nutrientes pela forragem consumida das pastagens de inverno durante os dois ou três pastoreios realizados no inverno.

O sistema de culturas empregado também tem influência na disponibilidade de P e K no solo. Baseando-se nas quantidades de P e K exportados pelas culturas da soja e do milho, pode-se inferir em qual sistema de culturas apresentará maior disponibilidade de nutrientes para uma mesma dose de adubo aplicado. A cultura da soja exporta em média 10,1 kg de fósforo e 21,11 kg de potássio por tonelada de grãos produzida (Pauleti, 1998; Embrapa, 2000; SLC Agrícola, 2001; Coodetec/Coamo, 1998; Fundação MT, 2002), enquanto que a cultura do milho exporta 3,4 e 4,7 kg de fósforo e 4,3 e 6,5 kg de potássio por tonelada de grãos produzido para produtividades de 5,9 e 9,1 Mg ha⁻¹ de grãos, respectivamente (Fancelli & Dourado Neto, 2000 apud Bull, 1993).

Assim, pode-se esperar que ao longo dos anos, áreas que foram cultivadas com milho apresentem teores mais altos de P e K do que áreas cultivadas com a cultura da soja. Áreas submetidas a rotação soja/milho tenderiam a apresentar valores intermediários de disponibilidade de nutrientes caso a produtividade da soja

e do milho em rotação serem as mesmas da soja e do milho em monocultivo. Porém, Santos & Reis (2001) demonstram que o rendimento de grãos das culturas da soja e do milho é beneficiado pelo uso de rotação de culturas. Assim, devido a maior exportação de nutrientes promovida pelo maior rendimento de grãos é possível que ocorra redução na disponibilidade de P e K em sistemas de rotação de culturas do que em sistemas de monocultivo. Santos et al. (1998) observou maiores valores de P extraível num sistema de monocultivo trigo/soja do que em sistemas de rotação de culturas envolvendo milho no verão e diversos cereais de inverno.

Mais estudos são necessários para o aprofundamento do entendimento da dinâmica de nutrientes em sistemas de rotação e sucessão de cultura no sistema plantio direto.

2.5. Hipóteses

A intensificação da frequência de pastoreios bovino em áreas de integração lavoura-pecuária, afeta a dinâmica da MOS reduzindo as taxas de acúmulo ou provocando a redução dos estoques de CO e NT devido ao menor aporte de resíduos vegetais ao solo.

A utilização de sistemas de culturas que promovam maior produção de biomassa vegetal compensa os efeitos deletérios do pastoreio bovino sobre a dinâmica da MOS.

Os diferentes compartimentos da MOS apresentam coeficientes de humificação e mineralização distintos, resultando em uma dinâmica distinta dos estoques de CO em cada fração.

2.6. Objetivos

Avaliar o efeito da utilização, durante 4 anos, de diferentes frequências de pastoreios e sistemas de culturas de verão sobre os estoques de CO e NT no solo nos seus diferentes compartimentos, em áreas de integração lavoura-pecuária.

Estimar através de um modelo matemático unicompartmental os coeficientes de conversão do C adicionado ao solo em C orgânico e as taxas de mineralização da MOS.

Calcular os estoques estáveis de CO no solo, através da parametrização do modelo com os dados obtidos em 4 anos de condução do experimento, nas diferentes combinações de manejo das pastagens de inverno e sistema de culturas de verão.

Prever as perspectivas futuras sobre as variações nos estoques de CO do solo, através da aplicação do modelo matemático.

Avaliar o fracionamento físico da MOS em MOp e MOam, como ferramenta de incremento de sensibilidade no entendimento da dinâmica dos estoques de CO e NT no solo e utilizar o IMC como índice indicador de qualidade do solo.

Verificar a ordenação teórica dos tratamentos dentro de um conceito de qualidade do solo.

Observar as variações na disponibilidade de P e K em função da frequência de pastoreio utilizada no inverno e sistema de culturas de verão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Localização

A realização deste trabalho constou da instalação de um experimento a campo em área pertencente à Agropecuária Capitão Rodrigo, de propriedade do Sr. José Davi Nicoloso e sua esposa Mara da Silveira Nicoloso, localizada no município de Jari, RS (latitude 29° 17' S, longitude 54° 13' W e altitude 441m), na região do Planalto Médio gaúcho. O seu início deu-se no mês de Novembro de 2001, sendo que para este trabalho, foram analisados apenas os resultados de planta e solo obtidos entre Outubro de 2003 e Janeiro de 2005.

3.2. Clima e Solo

Não existem informações precisas sobre a caracterização do clima da região em que foi conduzido o experimento, sendo que as estações meteorológicas mais próximas se localizam a cerca de 100 Km de distância, no município de Santa Maria e a 50 Km, no município de Júlio de Castilhos. Porém, segundo Brasil (1973), o clima da região é classificado como sendo do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen, com precipitações e temperaturas médias anuais variando entre 1.558 e 1.762 mm e 17,1 e 17,9 °C, aproximadamente.

O solo do local é classificado como um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico típico (Embrapa, 1999), de relevo ondulado a suavemente ondulado. Por ocasião da implantação do experimento, no ano de 2001, foram coletadas amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade a fim de caracterizá-lo quimicamente e prever a necessidade de calagem e adubação. Com o objetivo de caracterizar a constituição granulométrica do perfil de solo, foram coletadas amostras das camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade, segundo o método de Pipeta, descrito por Embrapa (1979). Na tabela 1, encontram-se os resultados da análise de fertilidade do solo realizada pelo Laboratório de Análises de Solo da Universidade Federal de Santa Maria e na tabela 2, os dados de granulometria do solo em profundidade.

TABELA 1. Resultado da análise de fertilidade do solo, antes da implantação do experimento de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2001.

Prof.	pH ¹	SMP ²	MOS ³	P ⁴	K ⁴	Ca ⁵	Mg ⁵	Al ⁵	H+Al	V ⁶	m ⁷
Cm	1:1		g dm ⁻³	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³				%	
0-10	4,9	5,3	45,0	2,7	155	3,0	1,3	1,0	7,0	40	17

¹pH em Água, ²Índice SMP, ³Matéria Orgânica do Solo, ⁴Fósforo e Potássio (Mehlich-I), ⁵Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis (KCl 1M), ⁶Saturação por bases, ⁷Saturação por Alumínio.

TABELA 2. Análise granulométrica do perfil de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2001.

Prof.	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
cm	% -----			
0-10	14,15	13,97	45,66	26,22
10-20	14,68	13,90	42,30	29,12
20-40	14,34	11,74	43,17	30,75
40-60	7,15	10,15	34,91	47,80
60-80	12,76	11,50	37,34	38,40

3.3. Histórico da Área

Anteriormente à instalação do experimento, a respectiva área era coberta por pastagem de campo natural sob pastoreio bovino, com uma lotação média anual de 0,8 U.A./ha, o que representa uma carga animal média anual de 360 kg de PV/ha. Anualmente, por ocasião do final do Inverno e geralmente no final do mês de Agosto, procedia-se a queima do campo nativo a fim de eliminar o material morto e permitir um rebrote mais vigoroso do mesmo ao início da Primavera, sendo que este manejo foi adotado até o ano de 1998. Entre 1998 e o início do experimento, no final de 2001, a cada um ou dois anos, adotou-se a roçada como forma de manejo do campo nativo a fim de promover o rebrote da pastagem natural no início da Primavera.

Em maio de 2001, foram retirados os animais da área onde viria a ser conduzido o experimento, devido a baixa disponibilidade de forragem existente no

local, a fim de que o pasto pudesse se recuperar para receber novamente os animais para pastoreios a partir do início da primavera.

No final de Setembro de 2001, a área experimental foi cercada a fim de restringir o acesso dos animais, procedendo-se posteriormente a aplicação de três toneladas de calcário dolomítico, PRNT 100 %, em superfície, para correção da acidez do solo e em Novembro do mesmo ano procedeu-se a dessecação do campo nativo e a semeadura das culturas da Soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e do Milho (*Zea mays* L.) já conforme o delineamento experimental planejado para o experimento.

3.4. Tratamentos e Delineamento Experimental

O experimento foi instalado obedecendo a um delineamento experimental em Blocos ao Acaso com parcelas arranjadas segundo a configuração bifatorial 3x3, com quatro repetições. Em cada parcela de cada bloco, foram coletadas duas amostras em cada avaliação realizada, perfazendo então um total de quatro repetições de cada tratamento. Cada parcela correspondia a uma área de 30 m². O fator A constou de três sistemas de manejo das pastagens de inverno: A₁ – Sem Pastoreio (SP), A₂ – Pastoreios a cada 28 dias (P28) e A₃ – Pastoreios a cada 14 dias (P14). O fator B foi formado de três sistemas de culturas de verão: B₁ – Monocultura de Soja (Mon-S), B₂ – Monocultura de Milho (Mon-M) e B₃ – Rotação Soja/Milho (Rot-S/M).

A figura 1 demonstra o croqui do experimento instalado durante uma seqüência de dois períodos de verão.

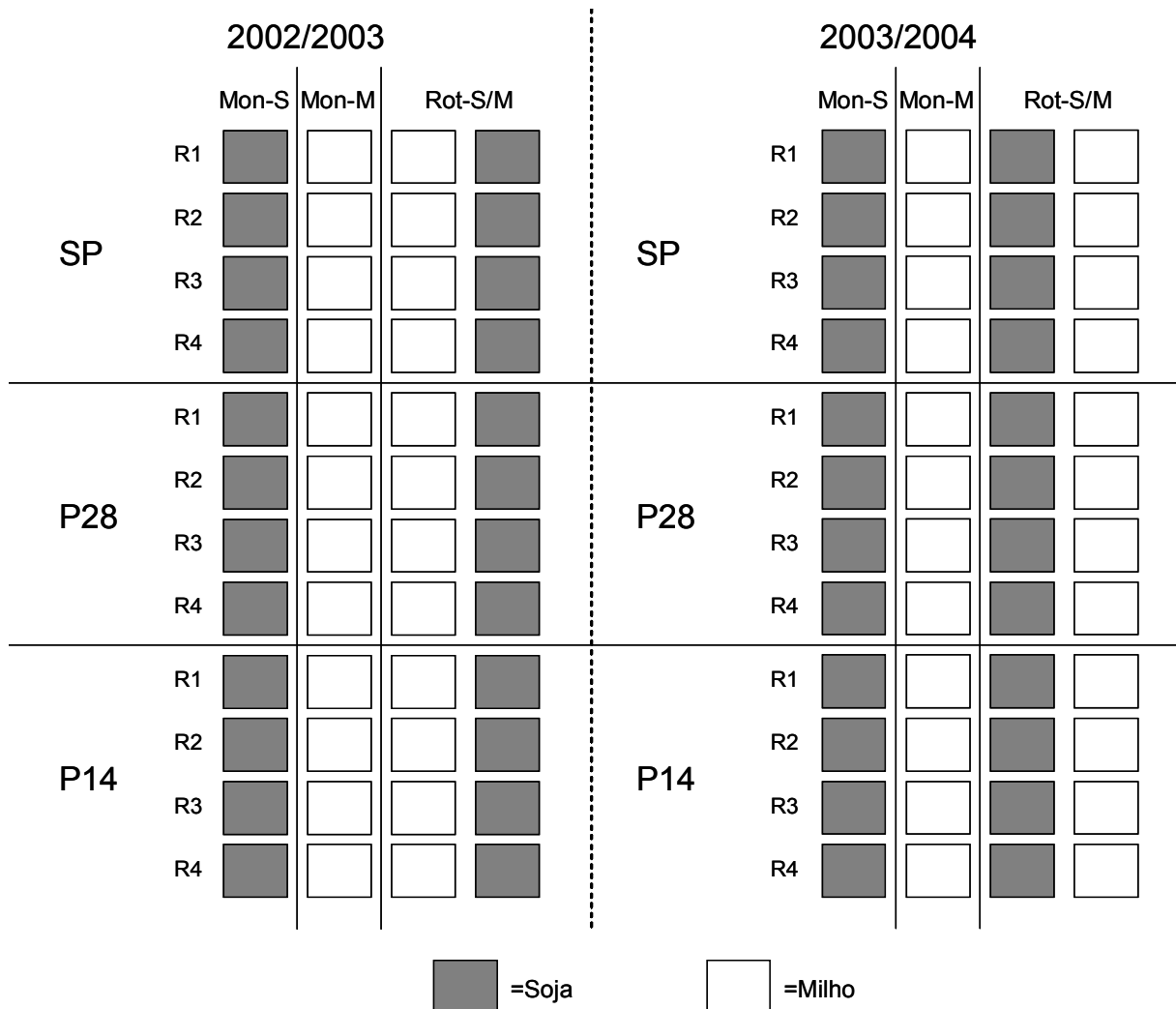


FIGURA 1. Croqui esquemático do experimento retratando a disposição dos tratamentos durante o verão.

3.5. Manejo e condução do experimento

Desde 2001, a área experimental vem sendo manejada de acordo com os tratamentos e delineamento experimental proposto para execução, sem alterações até o final deste trabalho. Observando mais detalhadamente o período de avaliação traçado para este trabalho – Outubro de 2003 a Janeiro de 2005 – pode-se registrar da seguinte maneira como foi conduzido o experimento a campo:

No dia 25 de Outubro de 2003, procedeu-se a semeadura das culturas de verão – Soja e Milho. Para tanto foram utilizadas sementes de soja da variedade RR-4910, de ciclo precoce e hábito de crescimento indeterminado, tratadas com

fungicidas e inoculadas com *Rhizobium* específico para a espécie. A população desejada para a cultura da soja foi de 340.000 plantas ha⁻¹, com espaçamento de 0,35 m entre linhas. As sementes de milho utilizadas eram do híbrido triplo BRS-3150, de ciclo precoce, tratadas com fungicidas. A população desejada para a cultura do milho foi de 60.000 plantas ha⁻¹, com espaçamento de 0,70 m entre linhas. A adubação N-P-K utilizada baseou-se nas recomendações técnicas da Comissão de Fertilidade... (1995). Para tanto, na cultura da Soja foram aplicados 400 kg ha⁻¹ de adubo de fórmula 0-20-20 (N-P-K) a lanço, no dia da semeadura. Para a cultura do milho foram aplicados 400 kg ha⁻¹ de adubo de fórmula 0-20-20 (N-P-K), juntamente com 30 kg ha⁻¹ de Nitrogênio, na forma de uréia, correspondendo a ¼ dos 120 Kg ha⁻¹ de Nitrogênio previstos para a cultura, ambos também a lanço e no dia da semeadura.

Os restantes ¾ da adubação nitrogenada foram aplicados em duas parcelas de 45 kg ha⁻¹ de nitrogênio, na forma de uréia, quando as plantas de milho estavam no estágio de 4 a 6 e 10 a 12 folhas, respectivamente. Durante o restante do desenvolvimento das culturas de verão, procedeu-se o manejo das mesmas de acordo com as recomendações técnicas vigentes para cada cultura quanto a aplicação de herbicidas, inseticidas ou fungicidas.

A colheita das culturas da Soja e do Milho deu-se no dia 15 de Março de 2004. Após a colheita das espécies de verão, procedeu-se a dessecação da área experimental, em 30 de Abril de 2004, com herbicida glyphosate, a fim de eliminar a vegetação espontânea existente na área.

Em seguida, no dia 15 de Maio de 2004, realizou-se a semeadura das pastagens de inverno. Foram utilizados na semeadura 80 kg ha⁻¹ de sementes viáveis de Aveia Preta (*Avena strigosa* L. (Schreb.)), juntamente com 20 kg ha⁻¹ de sementes viáveis de Azevém (*Lolium multiflorum* (L.)). Na operação de semeadura, as sementes de Azevém foram espalhadas a lanço na área e incorporadas pela passagem de uma semeadora para plantio direto contendo as sementes de Aveia, que foram semeadas em linha, com espaçamento de 0,175 m. Considerou-se que as pastagens haviam plenamente germinado no dia 29 de Maio de 2004. Não foi realizada adubação nitrogenada, fosfatada ou potássica para as espécies de inverno. É importante ressaltar que nos anos anteriores, a incorporação das sementes das culturas de inverno foi realizada através da passagem de grade niveladora, com um mínimo de abertura.

Os pastoreios realizados sobre as pastagens de inverno seguiram a frequência estipulada para cada tratamento, sendo que para o tratamento P14 foram realizados cinco pastoreios com intervalos de 14 dias entre os mesmos e para o tratamento P28 realizaram-se 3 pastoreios com intervalos de 28 dias. Os pastoreios previstos para o tratamento P14 ocorreram nos dias 31 de Julho, 14 e 31 de Agosto e 15 e 29 de Setembro de 2004. No tratamento P28, os pastoreios ocorreram nos dias 31 de Julho, 31 de Agosto e 29 de Setembro de 2004.

Os pastoreios foram realizados com fêmeas de bovinos da raça Aberdeen Angus com idade média de 5 anos e peso aproximado de 350 kg. Os animais eram conduzidos à área destinada ao pastoreio e permaneciam por até 2 horas no local. Foi tomado o cuidado para que todas as parcelas fossem pastejadas uniformemente, direcionando os animais durante o pastoreio. Ao final, os animais eram retirados quando atingia-se um resíduo médio de 10 cm de altura de forragem em todas as parcelas. Após a saída dos animais realizava-se a adubação nitrogenada em cobertura quando o cronograma assim o previa.

Após o último pastoreio realizado no dia 29 de Setembro de 2004, proporcionou-se às pastagens um período de descanso de aproximadamente um mês, para que as mesmas pudessem acumular fitomassa para a cobertura do solo e semeadura das espécies de verão. Logo após este período, procedeu-se a dessecação da área experimental, no dia 30 de Outubro de 2004.

3.6. Ordenação teórica dos tratamentos quanto a qualidade do solo

A partir do trabalho de Vezzani (2001) o conceito de qualidade do solo utilizado neste trabalho tem como base teórica a termodinâmica do não equilíbrio aplicada ao sistema solo, como proposto por esta pesquisadora e utilizado por Conceição et al. (2005). Portanto, a ordenação teórica dos tratamentos foi baseada nos resultados disponíveis na literatura sobre qualidade do solo, manejo e dinâmica da MOS e modelagem da MOS (Vezzani, 2001; Conceição et al., 2005; Bayer, 1996; Bayer et al., 2001a, 2001b, 2002, 2004; Lovato, 2001; Lovato et al., 2004; Diekow, 2003; Mielniczuk et al., 2003)

Desta maneira a Figura 2 demonstra a ordenação teórica, em níveis crescentes de qualidade do solo, proposta para este trabalho, com base no CO do solo.

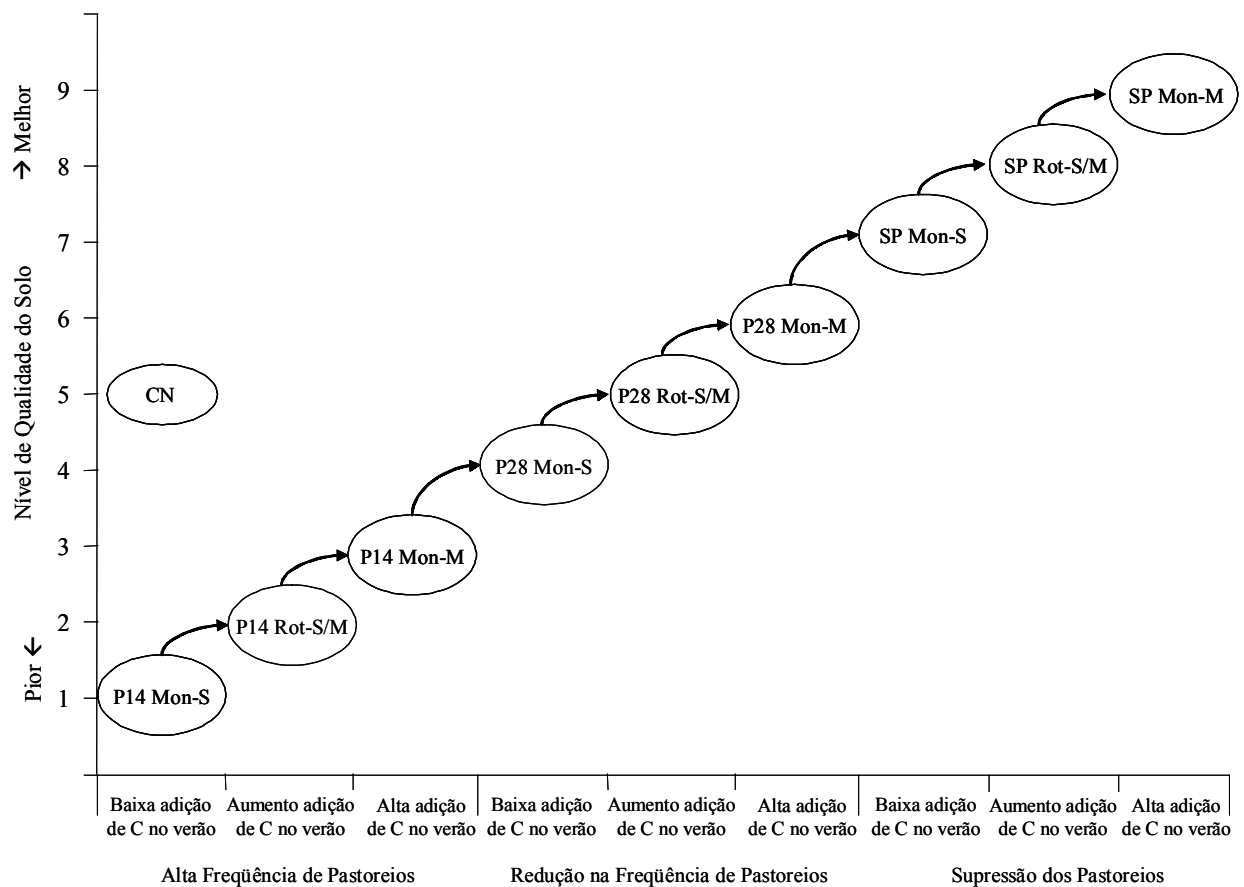


FIGURA 2. Ordenação teórica dos níveis de qualidade do solo expressos pelos compartimentos do CO do solo, propostos para o trabalho, em função da frequência de pastoreio aplicada no inverno e sistemas de culturas de verão.

Este modelo teórico representado na Figura 2 utiliza um fator principal (frequência de pastoreio) e outro secundário (sistemas de culturas) para explicar as alterações provocadas pelos tratamentos sobre os indicadores de qualidade do solo. Neste caso, teoriza-se que a frequência de pastoreio tenha mais influência sobre a qualidade do solo do que os sistemas de culturas utilizados. Em outras palavras, a redução da frequência de pastoreios até a sua supressão traria melhorias a qualidade do solo, num nível superior do que a opção por um sistema de culturas com maiores adições de C a solo caso fosse mantida a mesma frequência de pastoreios.

3.7. Avaliações

3.7.1. Matéria Seca das Pastagens

A avaliação da produção de fitomassa pelas pastagens de inverno foi realizada sempre por ocasião dos pastoreios realizados, determinando-se então, a quantidade de forragem consumida pelos animais e a quantidade de forragem residual após o pastoreio. Antes e após a realização dos pastoreios foram coletadas amostras da pastagem, determinando-se, por diferença, a quantidade de matéria seca consumida pelos animais e a quantidade de matéria seca residual. Ao final do ciclo das forrageiras também se procedeu a coleta de amostras da fitomassa existente a fim de determinar a quantidade de matéria seca acumulada para cobertura de solo. Para tanto, foram utilizados anéis de metal de 0,36 m de diâmetro e área de 0,1 m². As amostras foram cortadas rente ao solo com o auxílio de uma tesoura de esquilar, ensacadas e secas em estufa de ventilação forçada a 60 ± 5 °C até que atingissem peso constante.

3.7.2. Ganho de Peso Animal por Área

O ganho de peso animal por hectare obtido ao final do período de utilização da pastagem foi calculado em função da quantidade de matéria seca consumida pelos animais durante os pastoreios e de uma conversão alimentar média dos bovinos, que segundo Restle et al. (1998a) e Fontaneli et al. (2000b), pode ser fixada em 10 kg de matéria seca consumida para 1 kg de ganho de peso vivo

3.7.3. Lotação Animal

A lotação animal foi calculada em função da quantidade de forragem consumida pelos animais e com base nos dados de Rovira (1996) que indicam o consumo de 3 % do peso vivo por dia de matéria seca vegetal por vacas de 350 kg, quando as plantas estão no estágio vegetativo.

3.7.4. Matéria Seca na Maturação Fisiológica do Milho

A determinação do acúmulo de fitomassa pelas plantas de milho por ocasião da sua maturação fisiológica foi realizada através do corte, rente ao solo de quatro plantas de Milho escolhidas aleatoriamente no interior da parcela. As amostras coletadas foram levadas a estufa de ventilação forçada a 60 ± 5 °C e secas até que atingissem peso constante.

3.7.5. Matéria Seca no estágio R₄ da Soja

A determinação do acúmulo de matéria seca da das plantas de soja foi realizada a partir da coleta das plantas presentes em dois metros lineares de soja, cortando-as rente ao solo. A coleta foi realizada no estágio R₄ de desenvolvimento da soja – estágio de formação das vagens – a fim de determinar o resíduo de matéria seca aportado por esta cultura ao solo no final de seu ciclo (Padovan et al., 2002). As amostras coletadas foram levadas a estufa de ventilação forçada a 60 ± 5 °C e secas até atingirem peso constante.

3.7.6. Rendimento de Grãos de Soja e de Milho

O rendimento de grãos das culturas de verão foi determinado através da coleta de dois metros lineares de soja por amostra e das espigas de oito plantas de milho escolhidas ao acaso no interior da parcela por amostra. O material colhido foi embalado, debulhado manualmente e os grãos obtidos foram pesados e tiveram sua umidade ajustada a 13 %, determinando-se assim o rendimento de grãos.

3.7.7. Adições de C pelos sistemas de culturas

As adições de C pelos sistemas de culturas ao solo foram calculadas a partir da soma do C contido na matéria seca da parte aérea das pastagens de inverno e

culturas de verão, adicionando-se 30 % para raízes e exudatos. Tomou-se a concentração média de C no tecido vegetal de 40 % para este cálculo.

Em função das características do sistema de pastoreio empregado, rotativo e horário, em que os animais permaneciam apenas duas horas sobre as pastagens em cada pastoreio realizado e estes se repetiam apenas três (P28) ou cinco (P14) vezes por ano, não considerou-se as adições de C ou demais nutrientes oriundos da deposição das fezes dos animais. Devido a este sistema de pastoreio, ocorre menor deposição de fezes devido ao tempo reduzido que os animais permanecem na pastagem, assim optou-se por desconsiderar este fator. Além disto tomou-se o cuidado de se realizar as coletadas de solo em uma região da parcela experimental que não estivesse próxima de nenhum bolo fecal.

3.7.8. Fertilidade do Solo

Em novembro de 2004, antes da implantação das culturas de verão, foram coletadas as amostras para a determinação das características químicas do solo em todas as parcelas. Foram coletadas, com o auxílio de um trado calador, quatro subamostras de solo da camada 0-10 cm para compor uma repetição do tratamento. As amostras foram secas ao ar, moídas manualmente e peneiradas numa peneira de 2 mm de malha, homogeneizadas e subamostras de aproximadamente 50 g foram separadas e enviadas ao Laboratório de Análise de Solos da UFSM para a análise de fertilidade do solo. Nestas amostras foram determinados os teores de fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1), seguindo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

3.7.9. Matéria Orgânica do Solo

Em Janeiro de 2005, foram coletadas amostras para análise e fracionamento da Matéria Orgânica do Solo. Para tanto foram coletadas, com o auxílio de um trado calador, amostras das camadas 0-2,5, 2,5-5,0 e 5-10 cm de profundidade. Foram coletadas cinco subamostras da camada 5-10 cm e oito subamostras das camadas 0-2,5 e 2,5-5,0 cm para cada repetição. Em cada amostra foram determinados os

teores de Carbono e Nitrogênio Orgânicos Totais (COT e NT), seguindo as metodologias descritas por Nelson & Sommers (1996) e Tedesco et al. (1995), respectivamente. Para o fracionamento da MOS em Carbono e Nitrogênio Orgânico Particulados (COp e NTp) e Carbono e Nitrogênio Orgânico Associados à Minerais (COam e NTam), procedeu-se o fracionamento físico da MOS por peneiramento, segundo metodologia descrita por Cambardella & Elliot (1992). Após o fracionamento, as determinações do COp e Np seguiram as metodologias de Nelson & Sommers (1996) e Tedesco et al. (1995). Os teores de COam e NTam foram obtidos através de cálculo pela diferença entre os teores de COT e COp e NT e NTp, respectivamente. Não foram consideradas perdas de solo por erosão e embora não tenha sido notado nenhum processo erosivo laminar ou em sulcos em qualquer parte da área experimental, perdas por erosão foram desprezadas e eventuais camadas de solo perdidas foram compensadas com a inclusão da camada imediatamente abaixo.

3.7.10. Densidade do Solo

Os valores de densidade do solo (D_s) em cada tratamento foram obtidos a partir dos dados de Lanzanova (2005), que realizou a avaliação das propriedades físicas do solo no mesmo experimento e na mesma ocasião das coletas para avaliação de Matéria Orgânica do Solo referentes a este trabalho. As amostras para determinação da D_s foram coletadas segundo o método do anel volumétrico descrito por EMBRAPA (1997).

3.7.11. Análise Estatística

Os resultados obtidos no experimento foram submetidos à análise de variância, análise de regressão para os tratamentos de ordem quantitativa e comparação de médias pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) para os tratamentos de origem qualitativa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a condução do experimento. A primeira parte tratará dos rendimentos de grãos de milho e soja, ganho de peso animal e produção de matéria seca pelas pastagens de inverno. Num segundo momento serão apresentados os dados de aporte de C ao solo por cada tratamento utilizado. A seguir serão tratados os dados referentes ao CO do solo, quanto ao fracionamento deste em COT, COp, COam e a sensibilidade de cada fração ao manejo do solo, IMC, modelagem do CO, qualidade do solo e seqüestro de Carbono. Num quarto momento serão abordados os aspectos de fracionamento do NT. Logo após, serão discutidos os resultados alusivos a disponibilidade de P e K no solo. E, finalmente, realizar-se-á uma abordagem mais ampla sobre os dados gerados correlacionando-os e definindo a sua importância como componentes do rendimento das culturas e qualidade do manejo empregado.

4.1. Desempenho das pastagens de inverno e ganho de peso animal

Num sistema de pastoreio rotativo, o principal efeito do aumento da frequência de pastoreio é a redução do tempo de repouso propiciado às pastagens entre um pastoreio e outro, o que implica em uma menor disponibilidade de forragem no momento que os animais retornam ao mesmo piquete. No entanto, a maior disponibilidade de forragem no momento do pastoreio, quando se aplicam menores frequências de pastoreio (P28), não implica necessariamente numa maior carga animal quando se analisa todo o ciclo de pastoreio, visto que, considerando uma mesma área hipotética disponível, o sistema P28 apresenta piquetes menores do que o sistema P14, pois em cada frequência de pastoreio, a área total de pastagem disponível necessita ser subdividida de acordo com a frequência de pastoreio, ou seja, 28 piquetes na frequência de 28 dias e 14 piquetes na frequência de 14 dias entre os ciclos de pastoreio.

Em anos favoráveis ao desenvolvimento das pastagens, como foi o inverno de 2004, que apresentou boa disponibilidade de luz e água às plantas durante todo o inverno, a frequência de pastoreio costuma ter menor impacto sobre a taxa de

crescimento das pastagens. A taxa de crescimento das pastagens em função da frequência de pastoreio aplicada pode ser avaliada através da Figura 3, que representa a evolução da produção de matéria seca das pastagens de inverno ao longo de seu ciclo de crescimento.

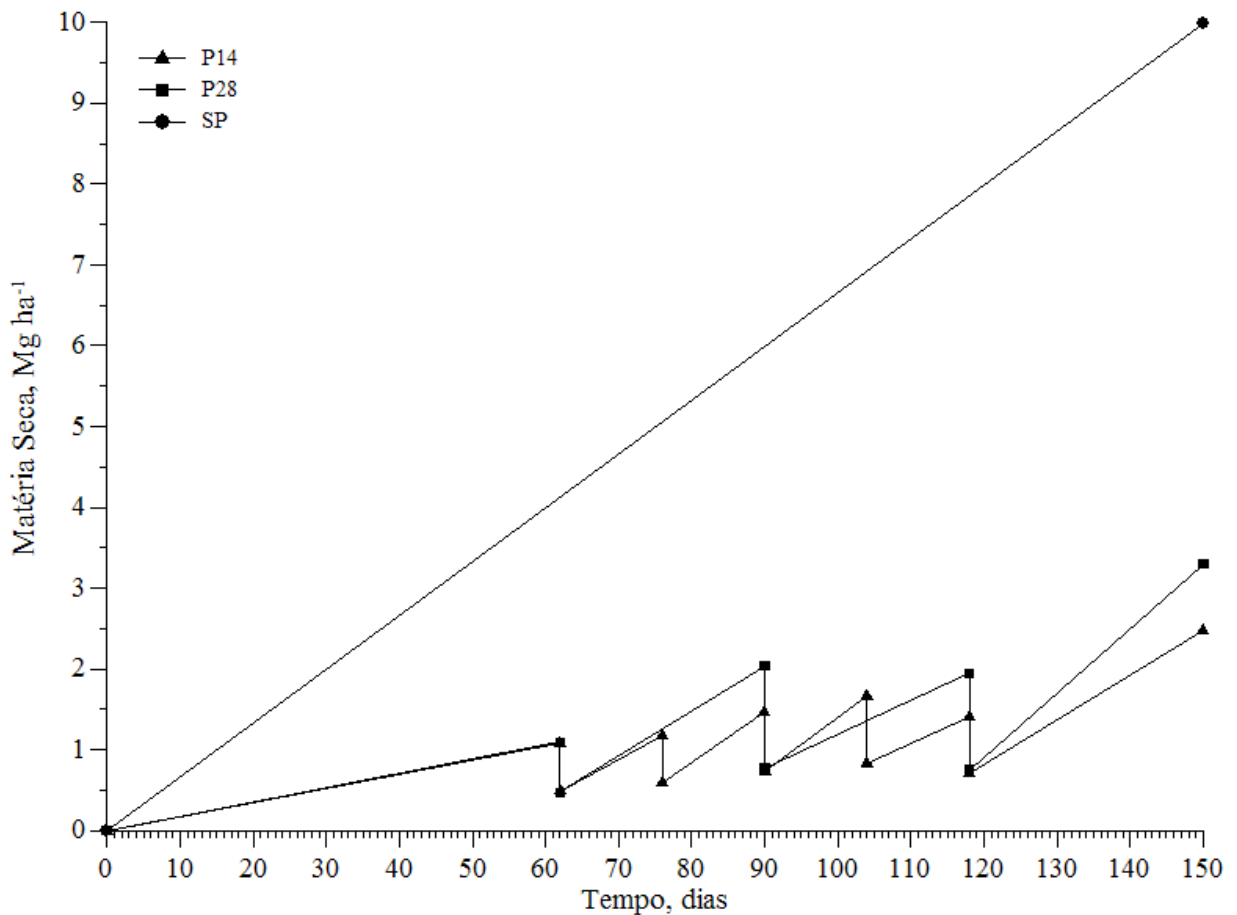


FIGURA 3. Evolução da disponibilidade de matéria seca das pastagens de inverno em função da frequência de pastoreio utilizada em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.

Pode observar-se que o aumento da frequência de pastoreios e a conseqüente redução do período de descanso das pastagens entre um pastoreio e outro não teve influência significativa sobre a taxa de crescimento das pastagens durante o período de pastoreio. Esta situação resultou em menor lotação animal no tratamento P28, o

que refletiu-se no ganho de peso animal ao final do período de pastoreio. A Tabela 3 apresenta os dados referentes a lotação animal durante os ciclos de pastoreio, o período total de pastoreio e o ganho de peso animal ao final deste período em função da frequência de pastoreio empregada.

TABELA 3. Lotação animal, período de pastoreio e ganho de peso animal em função da frequência de pastoreio empregada sobre as pastagens de inverno em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.

Tratamento	Ciclo de Pastoreio					Média
	1º	2º	3º	4º	5º	
Lotação Animal						
----- Animais ha ⁻¹ -----						
P28	2,12	4,32	4,06	-	-	3,50
P14	4,03	3,96	5,04	5,68	4,73	4,69
----- kg PV ha ⁻¹ -----						
P28	530	1512	1421	-	-	1154
P14	1410	1386	1763	1988	1655	1640
Duração						
----- dias -----						
P28	28	28	28	-	-	84*
P14	14	14	14	14	14	70
Ganho de Peso						
----- kg ha ⁻¹ -----						
P28	62,26	127,09	119,40	-	-	308,75
P14	59,25	58,25	74,13	83,54	69,59	344,77

* Soma.

Pode-se perceber pelo dados apresentados na Tabela 3 e na Figura 2, que no primeiro ciclo de pastoreio, a disponibilidade de forragem semelhante entre os dois sistemas de pastoreio resultou em um menor taxa de lotação neste primeiro período na frequência de 28 dias, o que certamente provocou a redução do ganho de peso ao final do período de pastoreio neste sistema, embora esta não tenha sido significativa. A carga animal utilizada em ambas as frequências de pastoreios foi semelhante à observada por Cassol (2003) em áreas de integração lavoura-pecuária sob pastoreio contínuo, quando foram aplicadas uma maior pressão de pastoreio, mantendo a altura de manejo das pastagem em cerca de 10 cm. Ainda assim, cabe

salientar que no tratamento P14, o período total de pastoreio foi 14 dias menor do que no tratamento P28, por terem ocorrido 3 e 5 ciclos de pastoreios respectivamente, apesar disto, o ganho de peso no tratamento P14 não foi prejudicado, o que demonstra o seu caráter mais intensivo.

Ainda pela Tabela 3 podemos notar que a medida que avançamos no ciclo das pastagens de inverno, temos aumento no ganho de peso animal em cada período de pastoreio. Isto nos indica a maior contribuição do azevém na oferta de forragem nestes períodos, devido a suas maiores taxas de crescimento no período de inverno e início da primavera. Estes dados concordam com os de Restle et al. (1998a) que apontam o período de final do inverno e início da primavera como o período de maiores taxas de crescimento das pastagens de inverno. Na Figura 4 podemos observar os resultados de ganho de peso animal em função da freqüência de pastoreio empregada e do sistema de cultura antecessor às pastagens de inverno.

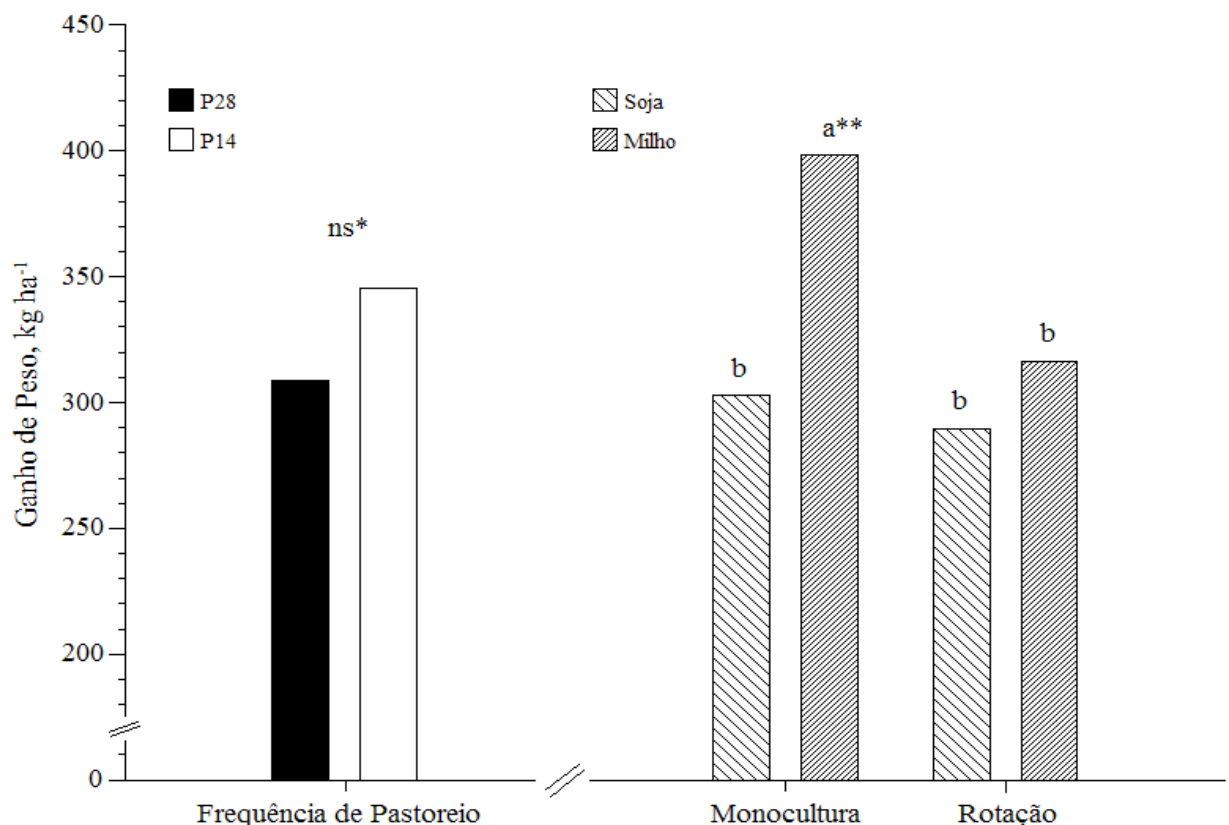


FIGURA 4. Ganho de peso animal em função da freqüência de pastoreio e sistema de culturas de verão empregado em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004. * ns = não significativo pelo teste F a 5 %. ** Tukey a 5 %.

Apesar da freqüência de pastoreio empregada não ter afetado significativamente o ganho de peso animal por área, o sistema de culturas de verão empregado anteriormente a implantação das pastagens de inverno, apresentou influência neste aspecto. Pode-se avaliar que nas áreas mantidas sob monocultura de milho no verão obteve-se maior ganho de peso, o qual é função direta da maior produção de forragem nestas áreas. Vários trabalhos indicam que a produção de forragem por gramíneas é beneficiada pela adubação nitrogenada (Lupatini et al., 1998a), presença de leguminosas (Giacomini et al., 2003) ou pela combinação de ambas (Lesama, 1997) em comparação com sucessões de culturas envolvendo apenas gramíneas ou sem adubação nitrogenada (Lovato, 2001). No entanto, o melhor desempenho das pastagens de inverno em sucessão a monocultura de milho pode ser explicada em parte, pela maior cobertura de solo nestas áreas, num ano que apresentou um período mais seco no período de germinação e desenvolvimento inicial das pastagens de inverno e, principalmente, pelos teores de P disponíveis no solo superiores no sistema de monocultura de milho em relação aos demais tratamentos, visto que as pastagens de inverno não recebiam adubação. Outro aspecto que pode ter influenciado neste resultado são os elevados teores de NT deste solo, que se mantiveram altos mesmo em sistemas de monocultura de gramíneas, amenizando possíveis problemas de imobilização de nitrogênio pela decomposição da palha depositada sobre o solo. Uma abordagem mais aprofundada sobre estes aspectos será realizada nos itens 4.4 e 4.5 deste capítulo.

O ganho de peso vivo diário por animal foi de $1,05 \text{ kg PV ha}^{-1}$, e foi calculado em função da lotação animal e o ganho de peso no período de pastoreio, sendo próximos aos observados por Restle et al. (1998a). Os ganhos de peso animal por área foram semelhantes aos observados por Fontaneli et al. (2000a) em áreas de integração lavoura pecuária sob pastoreio rotativo e intermediários aos obtidos por Cassol (2003) em áreas de integração lavoura-pecuária sob pastoreio contínuo.

Ao final do período de pastoreio, foi proporcionado um período de descanso de aproximadamente 30 dias para que as pastagens acumulassem fitomassa e fosse possível semear as culturas de verão. Neste ponto, segundo a Figura 3, pode-se observar mais claramente o efeito do aumento da freqüência de pastoreio (P14) sob a taxa de crescimento das pastagens ao final do período de pastoreio, quando estas foram de $79,58$ e $55,22 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, para os tratamentos P28 e P14, respectivamente. Isto resultou na produção de mais $816 \text{ kg MS ha}^{-1}$ no tratamento

P28, que alcançou 3,30 Mg ha⁻¹ de produção de MS, em relação ao tratamento P14, que alcançou 2,48 Mg ha⁻¹ de MS.

A Figura 5 apresenta os dados de produção de MS das pastagens de inverno ao final de seu ciclo em função da freqüência de pastoreio empregada anteriormente e sistemas de culturas de verão.

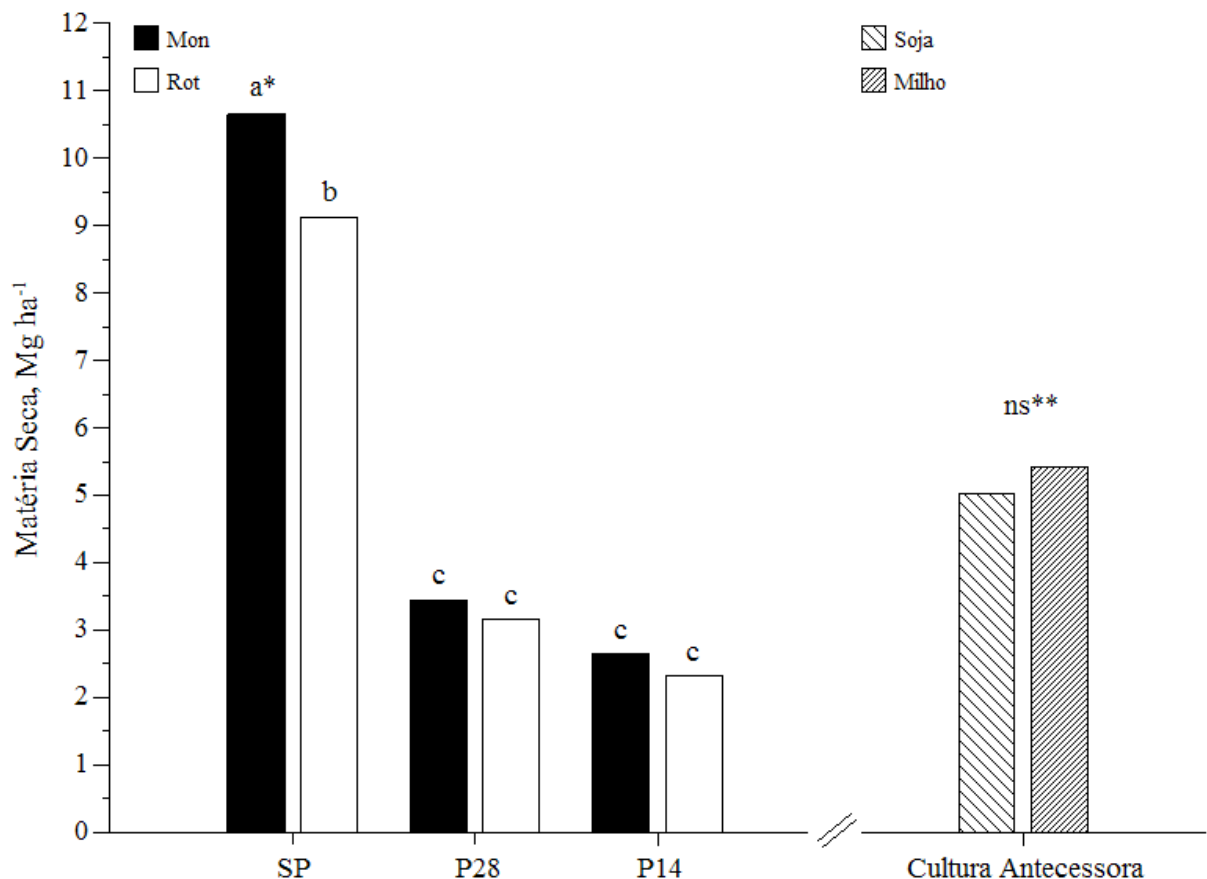


FIGURA 5. Produção final de matéria seca das pastagens de inverno em função da freqüência de pastoreios empregada, do sistema de monocultura ou rotação das culturas de verão e da cultura de verão antecedente em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004. * Tukey a 5 %. ** ns = não significativo pelo teste F a 5 %.

A partir da Figura 5, podemos observar o efeito supressor do pastoreio bovino sobre a produção final de matéria seca das pastagens de inverno destinada a cobertura e adição de C ao solo. Nota-se que a simples utilização das pastagens

para alimentação animal reduziu em mais de 5 Mg ha⁻¹ a produção final de matéria seca, sendo esta mais severa, ainda que não significativa estatisticamente, a medida que se aumenta a intensidade de pastoreio. Estes dados vão de encontro aos publicados por Cassol (2003) que observou redução de mais de 4 Mg ha⁻¹ de resíduo final das pastagens de aveia e azevém quando utilizou-se uma menor altura de manejo das pastagens, de 10 cm, sob pastoreio contínuo, em relação a uma área que não foi pastejada.

Pode-se ainda observar que as pastagens implantadas sobre monocultura de soja ou milho tiveram maior produção de fitomassa especialmente quando não sofreram pastoreios no inverno, sendo mantidas apenas para cobertura de solo. Este fato pode novamente ser explicado pela maior disponibilidade de P nestas áreas e relação as áreas que tiveram rotação entre as culturas da soja e do milho.

A cultura antecessora não apresentou influência sobre a produção de fitomassa das pastagens de inverno ao final do seu ciclo, fato este que reafirma as suposições sobre o efeito de que a maior cobertura do solo promovido pelo milho no período inicial de germinação e desenvolvimento propiciou um melhor desenvolvimento destas, compensando o fato da maior disponibilidade de N no solo quando estas pastagens eram implantadas após a cultura da soja.

4.2. Rendimento de grãos de Soja e Milho

O impacto do aumento da frequência de pastoreios sobre as pastagens de inverno não limita seus efeitos apenas na redução da produção final de palha para cobertura de solo pelas pastagens. O rendimento de grãos de soja e de milho foram afetados significativamente pelo aumento da frequência de pastoreio sob as pastagens de inverno antecessoras.

A Figura 6 demonstra os rendimentos de grãos de soja (a) e de milho (b) em função da frequência de pastoreio empregada durante o inverno e do sistema de monocultura ou rotação de soja e milho.

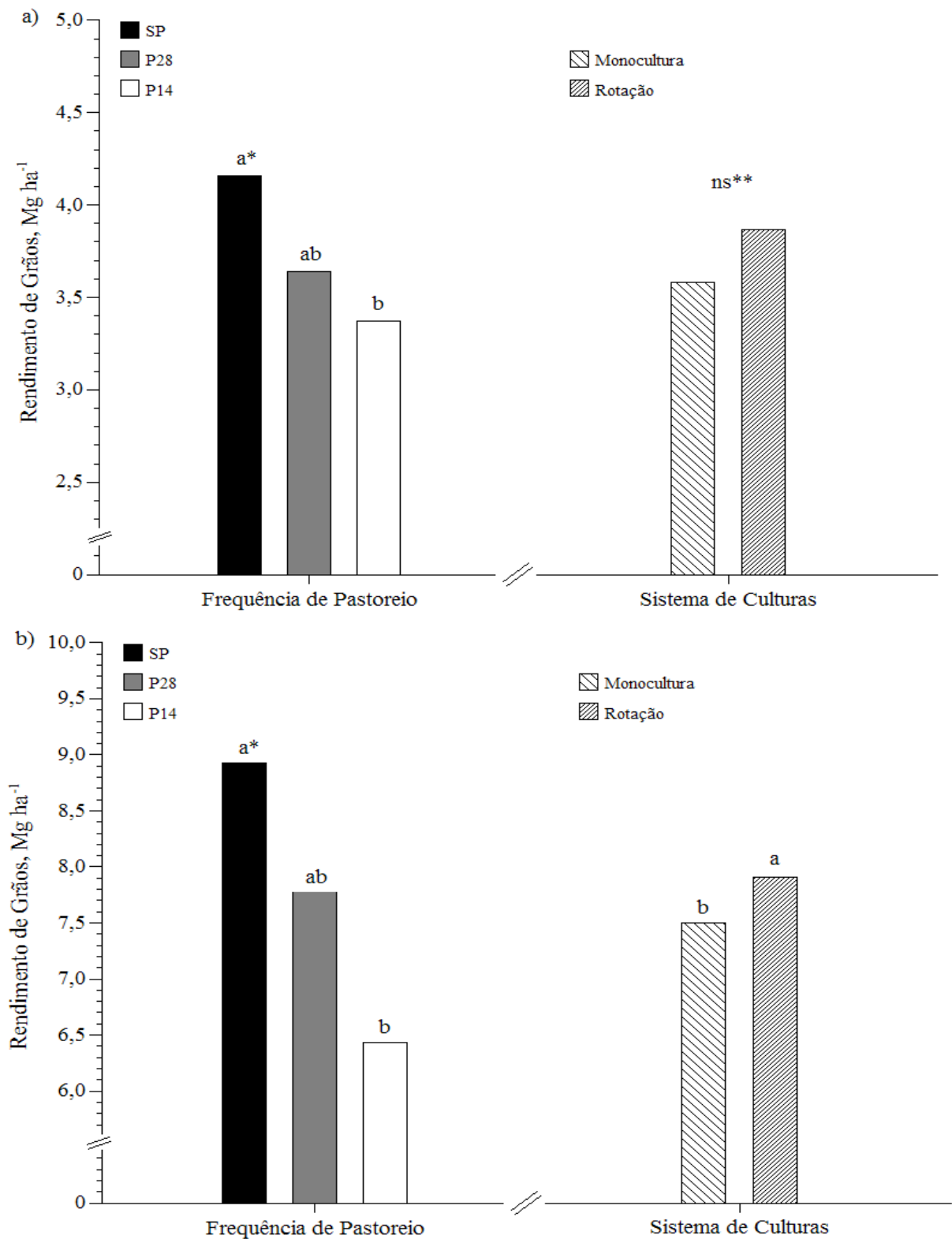


FIGURA 6. Rendimento de grãos de soja (a) e milho (b) em função da freqüência de pastoreio no inverno e sistema de monocultura ou rotação de soja/milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004. * Tukey a 5 %. ** ns = não significativo pelo teste F a 5 %.

Observa-se que o comportamento de ambas as culturas quanto a intensidade de utilização das pastagens de inverno foi semelhante, sendo que em ambos os casos o tratamento P14 reduziu significativamente o rendimento de grãos de soja e de milho em relação ao tratamento que não recebeu pastoreio no inverno (SP) em mais de 800 kg ha⁻¹ de soja e 2.500 kg ha⁻¹ de milho. O tratamento P28 apresentou rendimentos intermediários não diferindo significativamente do tratamento SP, embora tenha apresentando rendimentos inferiores em cerca de 500 kg ha⁻¹ de soja e 1.100 kg ha⁻¹ de milho.

Estes dados reforçam os observados por Cassol (2003) que observou a redução de aproximadamente 1.500 kg ha⁻¹ do rendimento de grãos soja quando a altura de manejo das pastagens de inverno passou de 40 cm para cerca de 10 cm. O autor atribuiu em parte a redução no rendimento da soja a menor população de plantas de soja ao medida que se intensificou a carga animal aplicada. No mesmo experimento, mas no ano subsequente, Flores (2004) observou resultados semelhantes quando comparou áreas submetidas a diferentes alturas de manejo das pastagem com áreas que não receberam pastoreios no inverno, encontrando redução de aproximadamente 500 kg ha⁻¹ no rendimento de grãos de soja em áreas manejadas com 20 cm de altura de pastagem em relação a áreas não pastejadas. Neste ano Flores (2004) não observou redução na população de plantas de soja nas áreas pastejadas.

Também pela Figura 6 pode-se avaliar o efeito da rotação de culturas sobre o rendimento de grãos de soja e de milho. Pode-se afirmar que a cultura do milho foi mais sensível e beneficiada pela rotação de culturas do que a cultura da soja, que não apresentou diferença significativa entre as áreas sob monocultivo ou rotação com o milho. Apesar disto, o rendimento de grãos de soja foi aproximadamente 300 kg ha⁻¹ superior nas áreas de rotação, representando uma tendência crescente ao observarmos os resultados obtidos nos anos anteriores deste experimento (Anexo H). Em contrapartida aos anos anteriores que não apresentaram diferenças de rendimento entre o milho em monocultura e o milho em rotação com a soja, pela primeira vez, na terceira safra de verão deste experimento, pode-se observar diferença significativa no rendimento de grãos de milho, sendo que nas áreas de rotação com soja, a produtividade foi cerca de 400 kg ha⁻¹ superior as áreas de monocultura. Outros pesquisadores observaram comportamento semelhante ao comparar áreas de rotação soja/milho com áreas de monocultivo destas duas

culturas. Derpsch (1991) apud Muzzilli (1981) relatou o aumento no rendimento de grãos de soja em rotação com milho da ordem de 330 kg ha^{-1} em comparação com áreas baseadas em monocultura. Derpsch (1991) apud Muzilli et al. (1983) também reporta aumento no rendimento de grãos de milho em áreas de rotação com a soja em relação a áreas mantidas sob monocultivo de milho. Santos & Reis (2001) relatam que o maior rendimento de grãos de milho em rotação com soja deve-se a maior disponibilidade de N nestas áreas devido a fixação biológica de N promovida pela soja. No mesmo trabalho, os autores apontam a redução do nível de severidade de doenças provocadas por fungos nas áreas de rotação com o milho como principal causa do aumento do rendimento de grãos de soja em rotação com o milho.

Não foi verificada presença significativa de doenças na cultura da soja durante o experimento, apesar disto o maior rendimento de grãos de soja em rotação com o milho pode estar relacionado a maior cobertura de solo nas áreas de rotação do que nas áreas de monocultivo e maiores conteúdos de MOS do que os verificados nas áreas sob monocultivo de soja.

Apesar da menor disponibilidade de P verificada nas áreas de rotação em comparação as áreas de monocultura, pode-se minimizar efeito deste aspecto sob o rendimento de grãos de soja e milho, pois estas recebiam adubação fosfatada e potássica segundo a recomendação da Comissão... (1995). Presume-se que a maior produtividade de grãos destas culturas no sistema de rotação de culturas pode ter concorrido para a diminuição dos teores de P extraíveis. Uma abordagem mais ampla sobre os fatores que concorreram para o maior rendimento das culturas de verão nas áreas de rotação soja/milho será realizada no item 4.6 deste capítulo, quando serão correlacionados os parâmetros de solo avaliados durante a condução do trabalho com os rendimentos das culturas utilizadas.

4.3. Adição de C ao solo pelas culturas de verão e inverno

Neste item, serão consideradas as adições de C durante todo o período de condução do experimento, desde seu início, em 2001 até o manejo das culturas de inverno e semeadura das culturas de verão, ao final de 2004, totalizando 4 anos de avaliações. As adições médias de C consideram um ciclo de rotação completo, sendo de um ano nos sistema de monocultura e dois anos no sistema de rotação de

culturas. Assim, as adições anuais de C no sistema Rot-S/M correspondem a média de adições das áreas rotacionadas. Este artifício de cálculo foi utilizado pois verificou-se que ao final do período avaliado os teores de CO observados no solo eram bastante semelhantes. A Tabela 4 apresenta as adições de C ao solo no somatório anual do C adicionado pelas pastagens de inverno e culturas de verão.

TABELA 4. Adições anuais de C pelos resíduos das culturas de verão e pastagens de inverno em função da freqüência de pastoreio e sistema de culturas de verão em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2004.

Tratamentos	Ano				Média	
	2001	2002	2003	2004		
----- Mg ha ⁻¹ -----						
SP	Mon-S	2,41	5,71	6,93	7,74	5,69
	Mon-M	2,41	6,33	9,31	12,30	7,59
	Rot-S/M	2,41	5,43	7,51	9,71	6,27
P28	Mon-S	2,41	4,42	3,09	3,56	3,37
	Mon-M	2,41	5,08	7,90	8,09	5,87
	Rot-S/M	2,41	4,20	6,10	5,84	4,63
P14	Mon-S	2,41	3,32	2,81	3,16	2,92
	Mon-M	2,41	4,31	5,79	6,49	4,75
	Rot-S/M	2,41	4,20	5,42	4,77	4,20

Pode-ser perceber que as adições de C vêm crescendo anualmente em função da melhoria da fertilidade do solo desde o início do experimento. Tomando como base as adições de C do ano de 2004 (Tabela 5), pode-se afirmar que as culturas de inverno são responsáveis, em média por 58, 36 e 33 % das adições anuais de C nas freqüências de pastoreio SP, P28 e P14, respectivamente. Isto nos dá a dimensão da redução do aporte de palha e conseqüentemente C ao solo pela presença do pastoreio bovino, visto que as adições absolutas de C pelas culturas de verão não variaram significativamente entre os sistemas de pastoreios. Considerando o sistema de culturas de verão empregado podemos notar as variações das adições de C por estas culturas, ao observarmos que as culturas de verão representam 40, 70 e 62 % das adições anuais de carbono nos sistemas de Mon-S, Mon-M e Rot-S/M. Desta maneira pode-se notar a importância da inclusão no esquema de rotação ou sucessão de culturas, espécies que apresentam alta produção de fitomassa,

como é o caso da cultura do milho, que permitiu o aumento da quantidade de C adicionado ao solo no sistema de Rot-S/M da ordem de 2,07 Mg ha⁻¹ em relação ao sistema de Mon-S e um aumento médio de C adicionado no sistema Mon-M de 4,08 Mg ha⁻¹ em relação a Mon-S.

TABELA 5. Adições de C pelos resíduos das culturas de verão e pastagens de inverno em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico no 4º ano. ACR, Jari – RS, 2004.

Tratamentos		Pastagens	Soja	Milho	Total
		----- Mg ha ⁻¹ -----			
SP	Mon-S	5,39	2,35	-	7,74 ¹
	Mon-M	5,67	-	6,63	12,30 ²
	Rot-S/M	4,75	2,63	7,30	9,71 ³
P28	Mon-S	1,46	2,11	-	3,56
	Mon-M	2,11	-	5,98	8,09
	Rot-S/M	1,65	2,25	6,13	5,84
P14	Mon-S	1,20	1,96	-	3,16
	Mon-M	1,55	-	4,94	6,49
	Rot-S/M	1,20	2,06	5,08	4,77

¹ Ct = Pastagens + Soja

² Ct = Pastagens + Milho

³ Ct = Pastagens + (Soja + Milho) / 2

4.4. Carbono Orgânico do Solo

4.4.1. Fracionamento e teores de CO no perfil do solo

O acúmulo de CO no solo no sistema plantio direto se dá preferencialmente nas camadas mais superiores do solo, em função da decomposição dos resíduos vegetais depositados sobre a superfície. Assim, podemos observar nas Figuras 7, 8 e 9, as concentrações de CO nas frações particulada (7), associada a minerais (8) e total (9) no perfil do solo, em função da frequência de pastoreio empregada (a) e do sistema de culturas de verão (b).

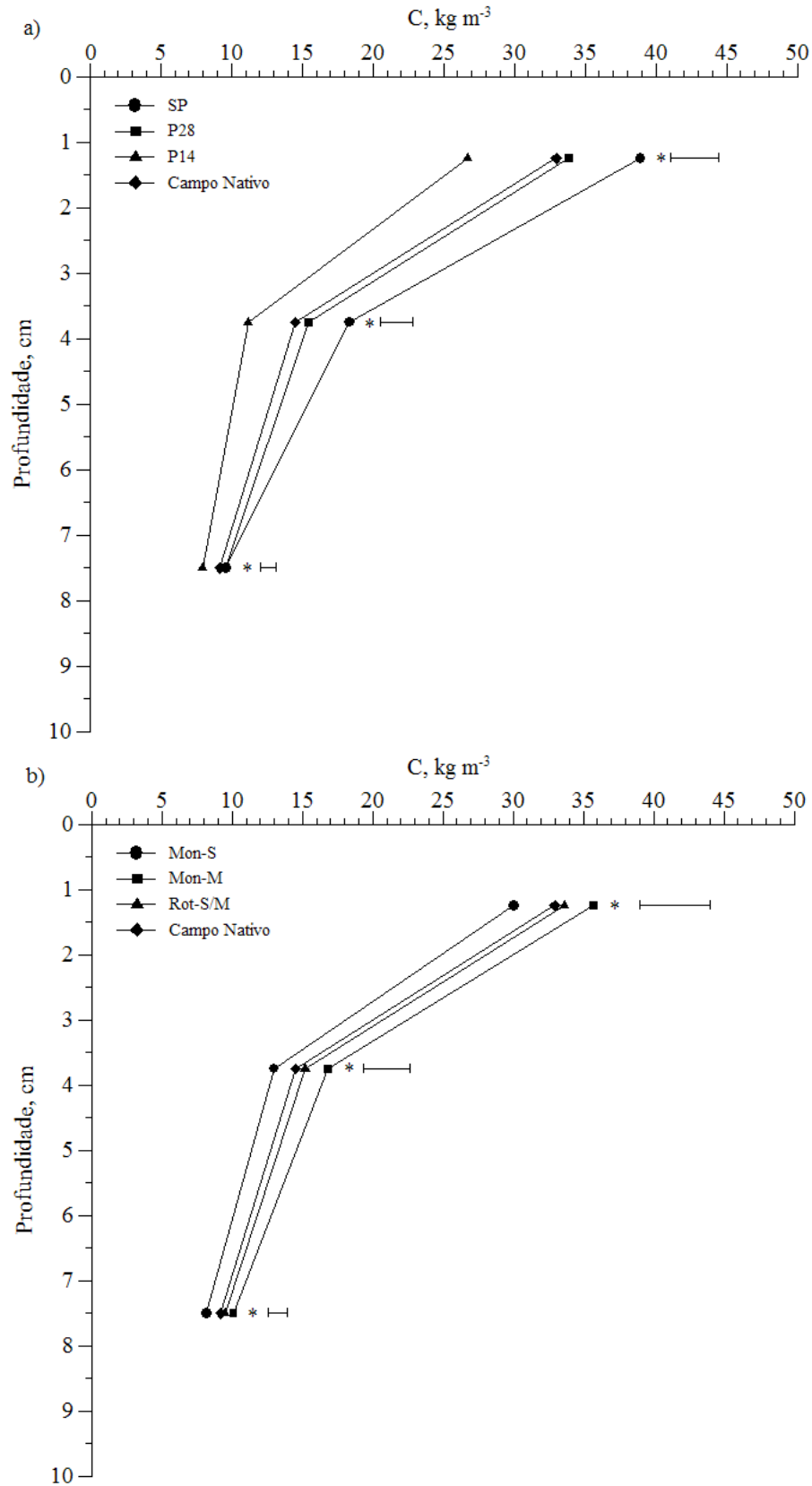


FIGURA 7. Teores de COp (>53 μm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. *DMS pelo teste Tukey a 5%.

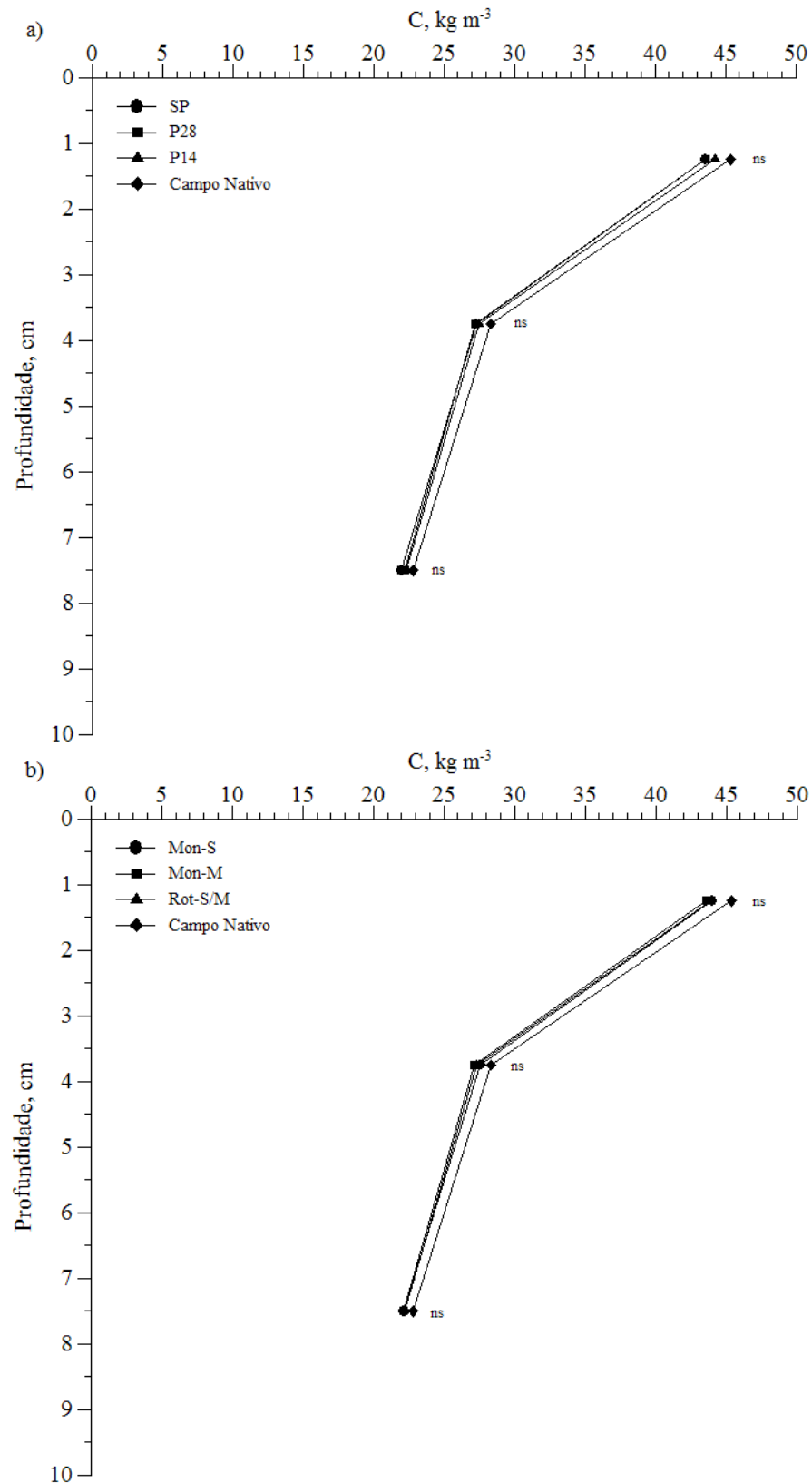


FIGURA 8. Teores de COam (<math><53 \mu\text{m}</math>) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. ^{ns} Teste F não significativo a 5%.

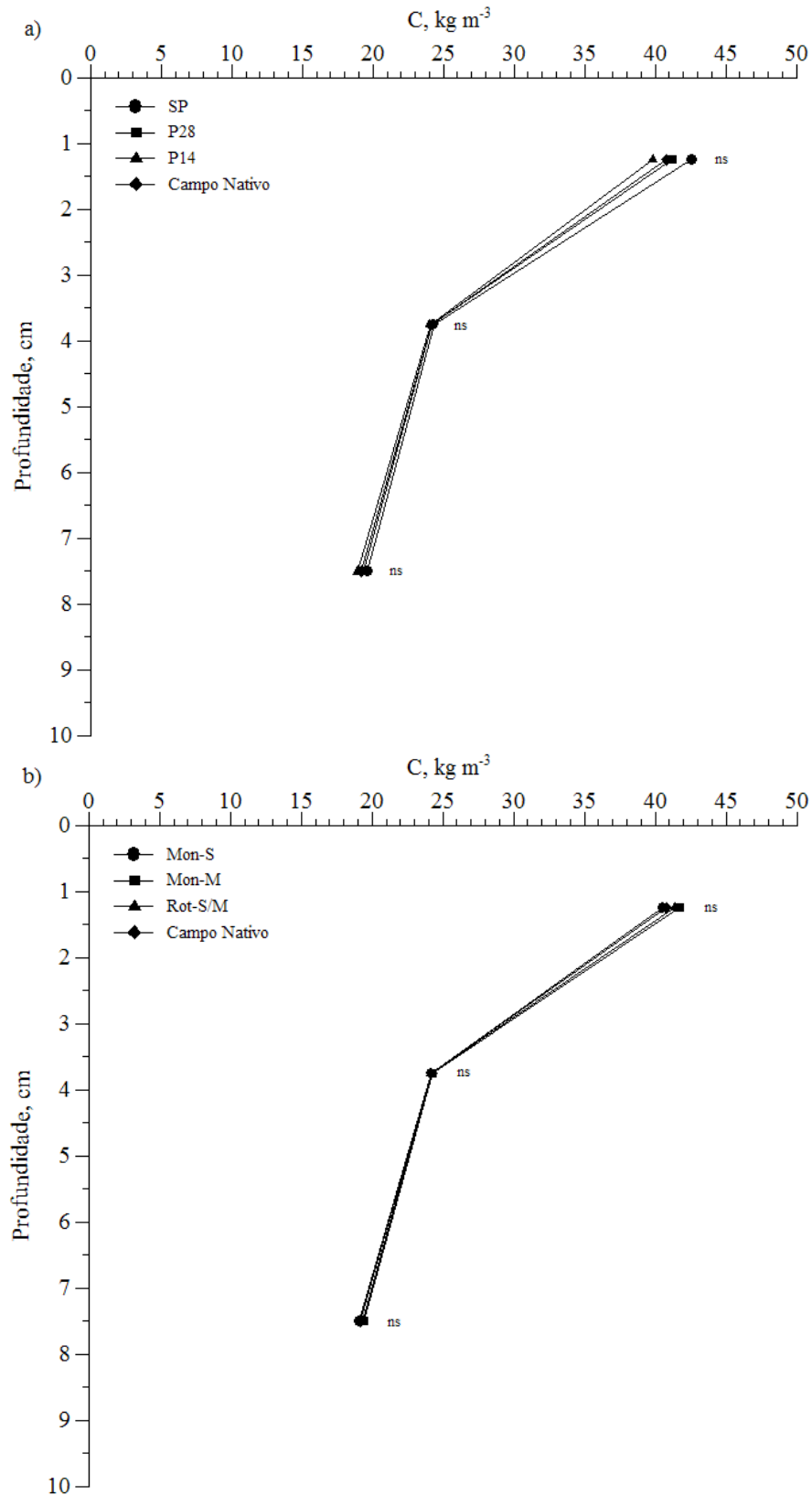


FIGURA 9. Teores de COT em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. ^{ns} Teste F não significativo a 5%.

Nas três figuras, pode-se avaliar a maior concentração de CO nas camadas mais superficiais do solo em todas as frações da MOS avaliadas. Isto se deve a deposição de resíduos vegetais sobre o solo, maior presença de raízes e liberação de exudatos e ao processo de decomposição destes resíduos e sua conversão em CO nas diversas frações da MOS. A camada superficial do solo pode ser considerada como zona de ativa decomposição dos resíduos vegetais e acúmulo de MOS em áreas de sistema plantio direto, onde o aporte de resíduos vegetais e conversão deste em MOS é maior do que a taxa de mineralização do CO. São nas camadas mais superficiais do solo que ocorrem os maiores impactos do sistema de manejo aplicado sobre a MOS, sendo estes mais limitados a superfície quanto menor for o tempo decorrido das modificações causadas pelo manejo do solo. Kern & Johnson (1993) comparando áreas de plantio direto e de preparo convencional observaram que as alterações nos estoques de CO ocorreram na camada de 0 – 8 cm, diminuindo na camada 8 – 15 cm e nulas abaixo desta camada. Em condições de clima Tropical, Bayer et al. (2001b) observou alterações nos estoques de CO na camada de 0 – 10 cm do solo.

Comparando a concentração dos teores de CO em suas diferentes frações, observa-se que as concentrações de CO_{am} é em média 35 % superior aos teores de CO_p na camada 0 – 2,5 cm, 85 % superior na camada 2,5 – 5 cm, e 136 % superior na camada 2,5 – 10 cm, o que demonstra a menor participação da fração particulada nas camadas mais inferiores do solo. Estes valores, assemelham-se aos observados por Sá et al. (2001) ao avaliar os estoques e concentrações de CO em diversas áreas cultivadas no sistema plantio direto. Os teores de COT foram intermediários aos observados nas frações particulada e associada a minerais da MOS embora bastante próximos dos teores de CO_{am}. Isto é explicado pela maior participação dos estoques de CO_{am} na composição dos estoques de COT, que foi de aproximadamente 80 % na camada 0 – 2,5 cm, 86 % na camada 2,5 – 5 cm e 89 % na camada 5 – 10 cm.

Nas figuras 8 e 9 observa-se que as avaliações dos teores de COT ou de sua fração associada a minerais (CO_{am}) não foram suficientemente sensíveis para indicar diferenças entre os sistemas de manejo aplicados, tanto quanto a frequência de pastoreio de inverno como em função do sistema de culturas utilizado. Estes resultados concordam com os de Bayer et al. (2004) que afirmam que mesmo comparando preparo convencional com sistema plantio direto, em curtos períodos de

tempo (< 6 anos) não se observam alterações nos estoques de CO_{am}. Tal fato pode ser explicado em parte pela magnitude dos estoques de COT ou CO_{am}, pois em razão de seus elevados valores, necessitam de grandes variações para que as mesmas sejam significativas, o que pode não ocorrer em curtos períodos de manejo e avaliações. Por outro lado, os estoques de COT são compostos, como dito anteriormente, em mais de 80 % pela fração CO_{am}. Esta fração apresenta pouca sensibilidade ao manejo em curtos períodos pela sua ciclagem mais lenta (Bayer et al., 2004), interação com a fração mineral do solo e formação de compostos organominerais, num processo de estabilização química (Christensen, 1996) e recalcitrância bioquímica (Bayer, 1996). Por outro lado, a fração CO_p, que foi sensível ao manejo aplicado, não foi suficientemente representativa nos estoques de COT para que as suas alterações se reflitam em curto prazo sobre os estoques de COT.

Observando mais detalhadamente a figura 7, nota-se a grande variação nos teores de C da fração particulada em função do manejo das pastagens de inverno e sistemas de culturas de verão. Apesar de diferenças significativas terem sido observadas em todas as camadas avaliadas, verifica-se que as maiores variações ocorreram na camada mais superficial do solo, diminuindo nas camadas adjacentes. As maiores variações nos teores de CO_p nas camadas mais superficiais do solo reforçam a dependência desta fração da adição de resíduos vegetais para a manutenção de seus valores. Segundo Sá et al. (2001), no sistema plantio direto, os teores de CO_p são mais de 75 % dependentes do C adicionado ao solo por resíduos vegetais na camada 0 – 2,5 cm e mais de 50 % na camada 2,5 – 5 cm.

Com relação a frequência de pastoreio empregada, o tratamento SP promoveu o aumento da concentração de CO_p em relação ao Campo Nativo, o que pode ser explicado pela alta adição de resíduos vegetais ao solo neste tratamento. Na frequência de pastoreio de 28 dias, os teores de CO_p mantiveram-se semelhantes aos observados no campo nativo, enquanto que o tratamento P14, ocorreu redução nos teores de CO_p comparados com os da condição original do solo. O sistema de culturas também apresentou tal comportamento, sendo que nas áreas de Mon-M os teores de CO_p foram superiores as do campo nativo e diferiram significativamente dos teores de CO_p do sistema Mon-S.

4.4.2. Estoques de CO e sensibilidade das frações granulométricas

A Tabela 6 apresenta os estoques de COT, COp e COam nas camadas 0 – 2,5, 2,5 – 5, 5 – 10 cm de profundidade em função da frequência de pastoreio empregada no inverno e sistema de culturas de verão.

TABELA 6. Estoques de COT, COp e COam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamentos		Ds	COp	COam	COT
Profundidade 0 – 2,5 cm					
		-- Mg m ⁻³ --	----- Mg ha ⁻¹ -----		
SP	Mon-S	0,87	1,81	7,26	9,10
	Mon-M	1,04	2,80	8,34	11,21
	Rot-S/M	1,06	2,73	8,50	11,29
P28	Mon-S	1,20	2,53	9,61	12,14
	Mon-M	1,17	2,53	9,69	12,25
	Rot-S/M	1,17	2,44	9,61	12,08
P14	Mon-S	1,20	1,72	10,09	11,76
	Mon-M	1,23	2,27	10,24	12,47
	Rot-S/M	1,29	2,16	10,74	12,88
Campo Nativo		1,09	2,24	8,85	11,09
Profundidade 2,5 – 5 cm					
SP	Mon-S	0,87	0,81	4,58	5,41
	Mon-M	1,04	1,32	5,29	6,65
	Rot-S/M	1,06	1,22	5,41	6,67
P28	Mon-S	1,20	1,09	6,10	7,19
	Mon-M	1,17	1,11	6,11	7,24
	Rot-S/M	1,17	1,04	6,12	7,17
P14	Mon-S	1,20	0,65	6,34	6,96
	Mon-M	1,23	0,99	6,40	7,38
	Rot-S/M	1,29	0,83	6,80	7,61
Campo Nativo		1,09	0,94	5,63	6,58
Profundidade 5 – 10 cm					
SP	Mon-S	1,30	1,25	11,40	12,68
	Mon-M	1,35	1,71	11,51	13,27
	Rot-S/M	1,37	1,63	11,81	13,49
P28	Mon-S	1,34	1,48	11,33	12,80
	Mon-M	1,36	1,55	11,62	13,19
	Rot-S/M	1,34	1,47	11,47	12,95
P14	Mon-S	1,33	1,09	11,36	12,41
	Mon-M	1,32	1,40	11,21	12,60
	Rot-S/M	1,30	1,23	11,14	12,35
Campo Nativo		1,34	1,39	11,39	12,78

Devido ao aumento da densidade do solo provocado pelo pisoteio bovino e a fim de evitar uma interpretação errônea dos dados apresentados, os estoques de CO no solo, em suas diferentes frações foram ajustados em função da densidade do solo no campo nativo, visto que os dados de estoque de CO não representam as variações nas concentrações de CO verificadas no solo e constam na Tabela 7.

TABELA 7. Estoques ajustados de COT, COp e COam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamentos		COp	COam	COT
Profundidade 0 – 2,5 cm				
----- Mg ha ⁻¹ -----				
SP	Mon-S	2,28	9,12	11,43
	Mon-M	2,92	8,69	11,68
	Rot-S/M	2,82	8,76	11,63
P28	Mon-S	2,29	8,71	10,99
	Mon-M	2,35	8,98	11,36
	Rot-S/M	2,28	8,97	11,27
P14	Mon-S	1,55	9,11	10,62
	Mon-M	2,00	9,00	10,99
	Rot-S/M	1,82	9,06	10,86
Campo Nativo		2,24	8,85	11,09
Profundidade 2,5 – 5 cm				
SP	Mon-S	1,02	5,75	6,79
	Mon-M	1,37	5,51	6,93
	Rot-S/M	1,26	5,57	6,87
P28	Mon-S	0,99	5,52	6,51
	Mon-M	1,03	5,66	6,71
	Rot-S/M	0,97	5,71	6,69
P14	Mon-S	0,59	5,73	6,28
	Mon-M	0,87	5,64	6,51
	Rot-S/M	0,70	5,74	6,42
Campo Nativo		0,94	5,63	6,58
Profundidade 5 – 10 cm				
SP	Mon-S	1,29	11,68	12,99
	Mon-M	1,70	11,40	13,14
	Rot-S/M	1,59	11,53	13,16
P28	Mon-S	1,48	11,32	12,80
	Mon-M	1,52	11,43	12,98
	Rot-S/M	1,47	11,45	12,93
P14	Mon-S	1,10	11,42	12,48
	Mon-M	1,42	11,33	12,74
	Rot-S/M	1,26	11,41	12,65
Campo Nativo		1,39	11,39	12,78

A partir deste momento, os valores de estoque de CO em todas as suas frações serão apresentados ajustados em função da Ds no campo nativo, como constam na Tabela 7. Sendo assim, eliminando-se o efeito de adensamento do solo pelo pisoteio bovino sobre os estoques de CO nos seus distintos compartimentos, verifica-se que os estoques de COT não foram alterados significativamente pelos tratamentos aplicados, assim como a fração associada a minerais do CO. No entanto, os estoques de COp foram sensíveis ao manejo aplicados sobre as pastagens de inverno e aos sistemas de culturas de verão. A Tabela 8 apresenta uma análise das frações granulométricas em função do manejo, indicando a sensibilidade de cada fração como indicativo de qualidade do manejo.

TABELA 8. Estoques de COp e COam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno e o sistema de culturas de verão, ajustados pela densidade do solo no campo nativo. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamento	COp			COam			COp/COT
	Mg ha ⁻¹	Δ %*	Δ Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Δ %	Δ Mg ha ⁻¹	
Profundidade 0,0 – 2,5 cm							
SP	2,67 a**	19,73	0,44	8,91	0,79	0,7	0,23 a
P28	2,31 b	3,58	0,08	8,90	0,68	0,65	0,21 a
P14	1,79 c	-19,73	-0,44	9,03	2,26	0,19	0,17 b
F (pastoreios)	57,77***			0,21 ^{ns}			44,84***
Mon-S	2,04 b	-8,52	-0,19	8,97	1,47	0,13	0,18
Mon-M	2,42 a	8,52	0,19	8,92	0,90	0,08	0,21
Rot-S/M	2,31 a	3,59	0,08	8,95	1,24	0,11	0,20
F (culturas)	9,34***			0,03 ^{ns}			4,59 ^{ns}
F (interação)	2,30 ^{ns}			0,22 ^{ns}			1,70 ^{ns}
C. Nativo	2,23			8,84			0,20
CV (%)	19,90			15,24			25,96
Profundidade 2,5 – 5,0 cm							
SP	1,21 a	28,72	0,27	5,65	0,35	0,02	0,18 a
P28	0,99 b	5,31	0,05	5,64	0,18	0,01	0,15 b
P14	0,72 c	-23,40	-0,22	5,68	0,88	0,05	0,11 c
F (past.)	48,50***			0,06 ^{ns}			127,75***
Mon-S	0,87 b	-7,45	-0,07	5,66	0,53	0,02	0,13 b
Mon-M	1,09 a	15,96	0,15	5,63	0,00	0,00	0,16 a
Rot-S/M	0,97 ab	3,20	0,03	5,69	1,06	0,06	0,15 a
F (cult.)	27,47***			0,04 ^{ns}			7,34***
F (inter.)	2,34 ^{ns}			0,12 ^{ns}			2,38 ^{ns}
C. Nativo	0,94			5,63			0,14
CV (%)	18,08			14,12			22,77

Tratamentos	COp			Coam			COp/COT
	Mg ha ⁻¹	Δ %	Δ Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Δ %	Δ Mg ha ⁻¹	
Profundidade 5,0 – 10,0 cm							
SP	1,52 a	9,35	0,21	11,57	1,67	0,19	0,12 a
P28	1,49 b	7,19	0,18	11,41	0,26	0,03	0,12 a
P14	1,44 b	3,60	0,05	11,36	-0,17	-0,02	0,10 b
F (past.)	17,54***			0,06 ^{ns}			4,05***
Mon-S	1,29 b	-7,19	-0,10	11,47	0,79	0,09	0,10
Mon-M	1,54 a	10,79	0,15	11,41	0,26	0,03	0,12
Rot-S/M	1,44 ab	3,60	0,05	11,48	0,88	0,10	0,11
F (cult.)	6,01***			0,01 ^{ns}			1,80 ^{ns}
F (inter.)	1,31 ^{ns}			0,01 ^{ns}			0,35 ^{ns}
C. Nativo	1,39			11,38			0,11
CV (%)	17,49			13,50			21,96
Profundidade 0,0 – 10,0 cm							
SP	5,41 a	18,12	0,83	26,14	1,08	0,28	0,17 a
P28	4,79 b	4,59	0,21	25,95	0,35	0,09	0,16 a
P14	3,77 c	-17,68	-0,81	26,08	0,85	0,22	0,13 b
F (past.)	76,28***			0,05 ^{ns}			36,50***
Mon-S	4,19 b	-8,51	-0,39	26,10	0,93	0,24	0,14 b
Mon-M	5,06 a	10,48	0,48	25,95	0,35	0,09	0,16 a
Rot-S/M	4,72 ab	3,04	0,14	26,11	0,97	0,25	0,15 ab
F (cult.)	16,28***			0,06 ^{ns}			6,42***
F (inter.)	2,74 ^{ns}			0,22 ^{ns}			1,75 ^{ns}
C. Nativo	4,58			25,86			0,15
CV (%)	15,77			13,66			19,32

* Δ foi calculada em relação aos estoques do campo nativo.

** Tukey a 5 %.

*** Teste F significativo a 5 %.

^{ns} Não significativo pelo teste F a 5 %.

Verifica-se, pela Tabela 8, que a fração particulada da MOS tiveram seus estoques afetados tanto pela frequência de pastoreio sobre as pastagens de inverno como pelos sistemas de culturas. As maiores variações nos estoques de CO desta fração foram observadas principalmente em função da frequência de pastoreio do que em função do sistema de culturas de verão, visto que o pastoreio bovino sobre as pastagens de inverno afetaram mais as adições de C ao solo. Observando cada camada de solo avaliada, verifica-se que as mais afetadas pelo manejo foram as camadas mais superficiais do solo, concordando com as informações de Sá et al. (2001). A maior variação na camada 2,5 – 5 cm em relação a camada 0 – 2,5 cm pode ser explicada, em parte, pelo uso da gradagem para incorporação das

sementes das pastagens de inverno, que pode ter influenciado a dinâmica do CO na primeira camada do solo.

Em todas as camadas, as áreas que não receberam pastoreio no inverno apresentaram acúmulo de COp em relação os estoques desta fração observados no campo nativo, diferindo estatisticamente dos estoques de COp observados no demais tratamentos. Estes resultados devem-se a maior adição de C via resíduos vegetais nestas áreas que não receberam pastoreio bovino. Da mesma maneira, a participação da fração particulada em relação aos estoques de COT foram aumentados no tratamento SP, em todas as camadas avaliadas. No tratamento P14, ocorreu redução nos estoques de COp em relação aos observados no solo sob condições originais, com exceção da camada 5 – 10 cm, que apresentou valores semelhantes aos do campo nativo. Também a participação a relação COp/COT foi reduzida por este tratamento. No sistema de pastoreio P28, que apresentou um comportamento intermediário aos demais, os valores de COp mantiveram-se semelhantes aos observados no campo nativo, com uma pequena tendência de aumento, o que também pode ser observado na representatividade desta fração em relação aos estoques observados de COT nestas áreas. Isto indica que a frequência de pastoreio P28 tende a ser mais sustentável a longo prazo e com possível melhoria das condições originais do solo, conforme o sistema de culturas utilizado, do que um sistema de pastoreio mais intenso como o tratamento P14, que em pouco tempo já apresentou redução dos estoques de CO na fração particulada.

Em relação ao sistema de culturas de verão utilizado, nota-se o melhor desempenho dos sistemas que tinham o milho em monocultura ou em rotação com a soja do que sistemas de culturas baseados apenas na monocultura da soja, com relação direta ao aporte de palha em cada sistema de cultura. A monocultura de milho, embora com valores de COp superiores, não diferiu significativamente dos estoques de COp observados no sistema de Rot-S/M, porém com estoques superiores aos do sistema de Mon-S. Na camada 0 – 2,5 cm, o sistema Rot-S/M apresentou estoques superiores de COp em relação aos verificados no sistema Mon-S, sendo que esta diferença não foi significativa nas camadas adjacentes.

Os tratamentos Mon-M e Rot-S/M, embora pequena no Rot-S/M, apresentaram elevação dos estoques de COp em relação aos observados no campo nativo, sendo este efeito mais pronunciado no sistema de Mon-M devido ao maior aporte de C neste sistema. Na média dos três sistemas de pastoreio, a utilização de monocultura

de soja causou a diminuição dos estoques de COp em relação aos do solo na sua condição original. Apesar disto, a utilização da Mon-S nas áreas que não receberam pastoreios apresentaram aumento dos estoques de COp, embora este acúmulo tenha sido inferior aos observados nas áreas que utilizaram sistemas de culturas que incluíram o milho no esquema de sucessão ou rotação de culturas. Por outro lado, a utilização da Mon-S nas áreas que receberam pastoreio no inverno, provocou a redução dos estoques de C desta fração da MOS, sendo este efeito mais pronunciado nas áreas que receberam maior frequência de pastoreio. Isto indica que a utilização da soja em monocultura em áreas de integração lavoura-pecuária pode ser prejudicial à qualidade do solo e levar o sistema de produção à insustentabilidade no futuro.

Seguindo as tendências observadas nos estoques de COp, a representatividade desta fração em relação aos estoques de COT, também foi afetada pelos sistemas de culturas. Assim, a relação COp/COT aumentou nas áreas de monocultura de milho e reduziu-se nas áreas de monocultura de soja, em relação aos valores observados no campo nativo, sendo que as áreas de rotação soja/milho mantiveram esta relação semelhantes às do solo em sua condição original.

Do ponto de vista da sensibilidade das frações granulométricas da MOS, observa-se que as avaliações dos estoques de COp foram expressivamente mais sensíveis do que as variações verificadas nos estoques de COam. Tomando as variações dos estoques das frações da MOS na camada 0 – 2,5 cm, verifica-se que os estoques de COp variaram 39,50 % entre os tratamentos SP e P14 e 17,4 % entre Mon-S e Mon-M, sendo que nos estoques de COam a variação máxima foi de 1,47 % entre os tratamentos relativos a frequência de pastoreio e 0,57 % entre os tratamentos relativos a sistemas de culturas. Apesar das diferenças serem menores com o aprofundamento nas camadas do solo, os estoques de COp continuaram mais sensíveis até a camada 5 – 10 cm. Considerando-se a camada 0 – 10 cm, verifica-se que os estoques de COp foram 49 vezes mais sensíveis as variações de manejo do que os estoques de COam em função da frequência de pastoreio empregada e aproximadamente 30,6 vezes mais sensíveis em relação aos sistemas de culturas de verão avaliados.

A Figura 10 demonstra os estoques de cada fração comparados aos do campo nativo, enquanto que a Figura 11, apresenta a comparação entre a sensibilidade das frações granulométricas da MOS na camada 0 – 10 cm.

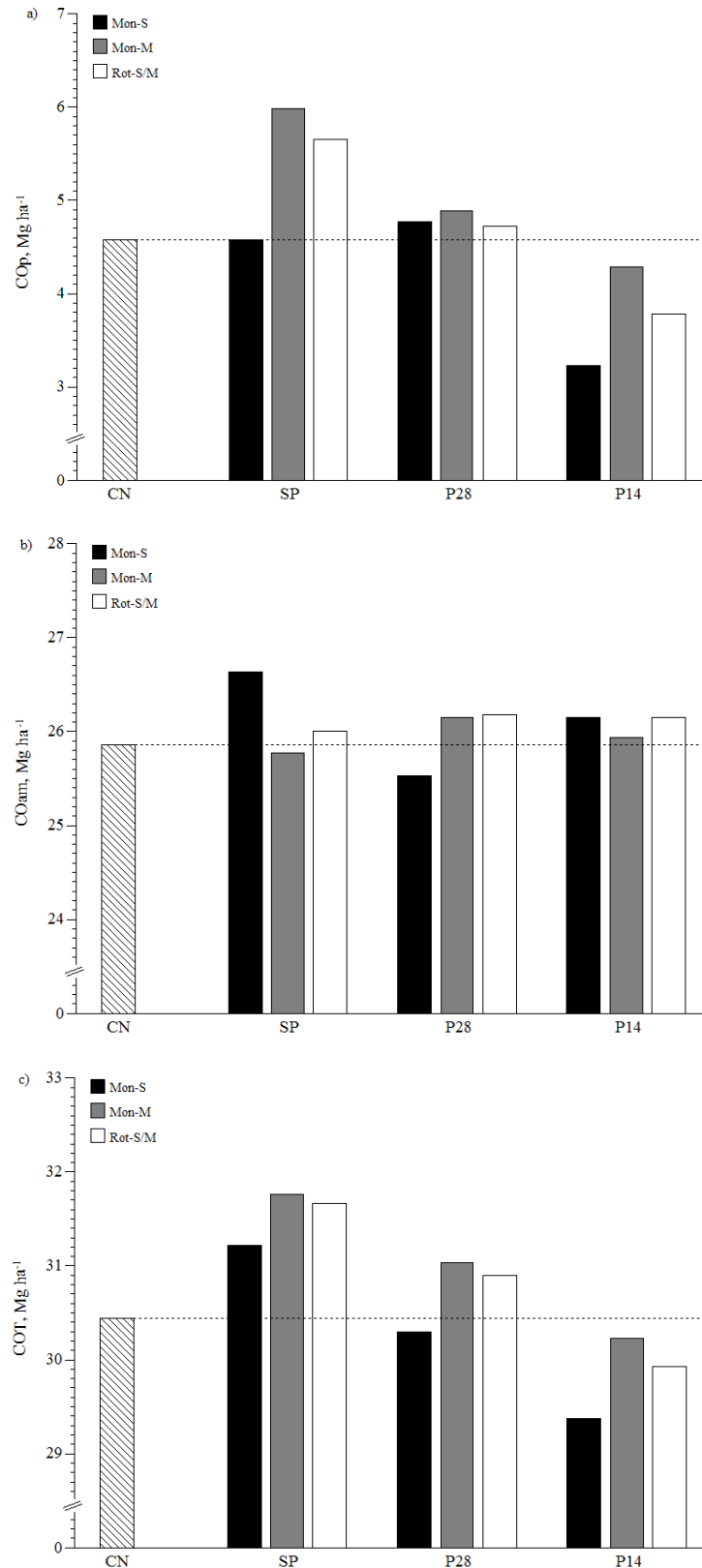


FIGURA 10. Estoques de CO nas frações particulada (a), associada a minerais (b) e total (c) na camada de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão empregado. ACR, Jari – RS, 2005.

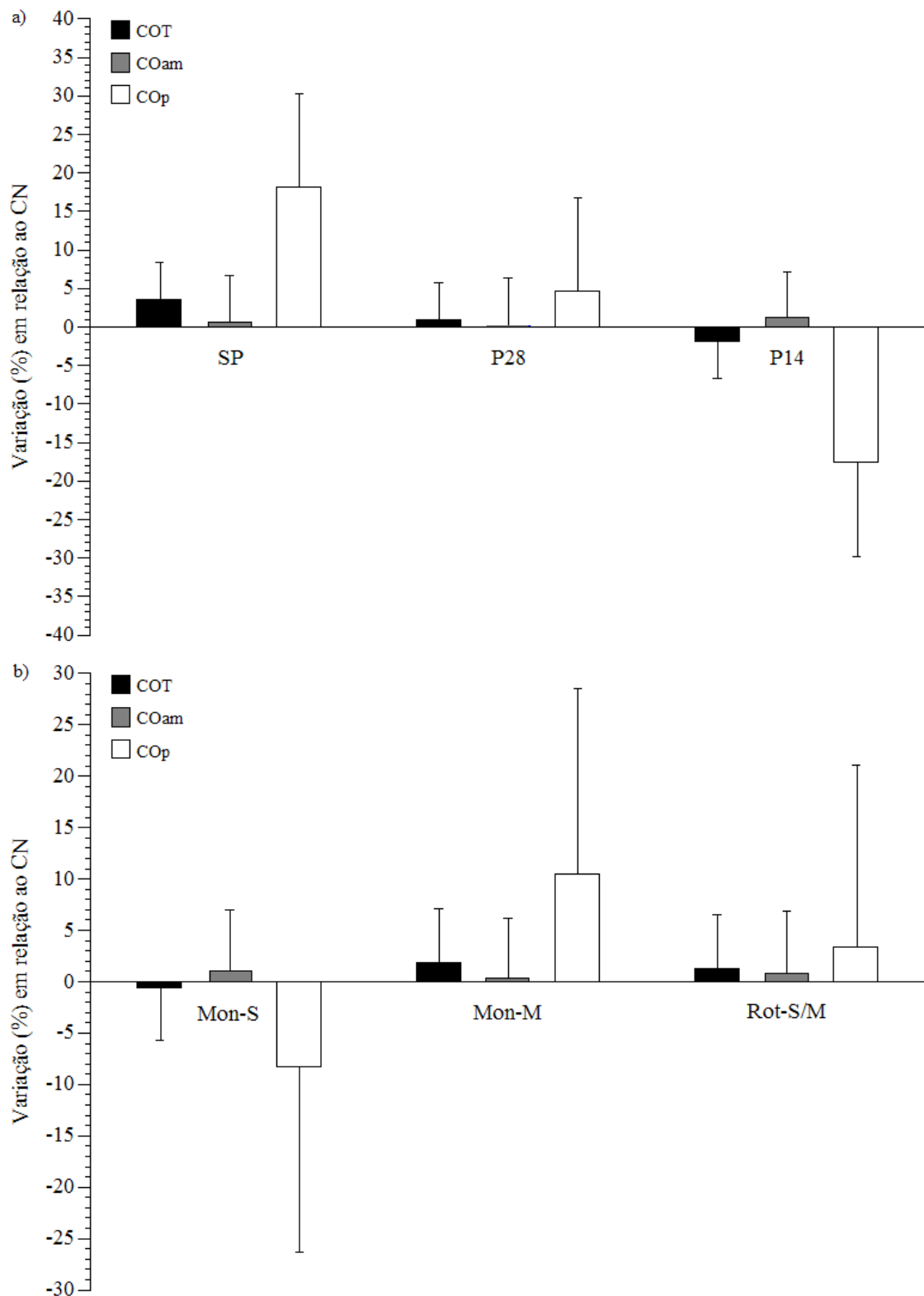


FIGURA 11. Variação percentual dos estoques de COT, COam e COp de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em relação ao campo nativo em função das freqüências de pastoreio (a) e sistemas de culturas empregado (b). ACR, Jari – RS, 2005.

Pelas Figuras 10 e 11, pode-se avaliar a sensibilidade de dos estoques de CO avaliados. Percebe-se que a fração particulada da MOS, aqui representada pelos estoques de COp, foi mais sensível que a fração associada a minerais e também aos estoques de COT avaliados, constituindo-se em importante ferramenta indicadora de qualidade de manejo em curtos períodos de avaliação, concordando com os resultados de Bayer et al. (2004). A menor variabilidade observada nos estoques de COT devem-se a alta proporção de COam do qual este é composto. O COam apresenta baixa sensibilidade ao manejo em curtos intervalos de avaliações devido a sua alta estabilidade promovida pelo seu elevado grau de humificação, interação com a fração mineral proteção física no interior de microagregados estáveis e maior recalcitrância química decorrente de sua composição (Bayer, 1996).

4.4.3. Índice de Manejo de Carbono

A Tabela 9 apresenta os resultados do Índice de Manejo de Carbono calculado em função das freqüências de pastoreio empregadas no inverno e sistemas de culturas de verão.

TABELA 9. Índice de Manejo de Carbono de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamento	COT	COp	COam	IEC	L	IL	IMC
	----- Mg ha ⁻¹ -----						
SP	31,55	5,41 a*	26,00	1,036	0,209 a	1,182 a	122,39 a
P28	30,75	4,79 b	25,92	1,007	0,186 a	1,055 a	105,86 b
P14	29,85	3,77 c	26,14	0,980	0,144 b	0,817 b	80,04 c
F(pastoreios)	3,50 ^{ns}	76,28**	0,05 ^{ns}	3,16 ^{ns}	32,83**	35,33**	70,03**
Mon-S	30,30	4,19 b	26,12	0,994	0,162 b	0,910 b	90,83 b
Mon-M	31,01	5,06 a	25,88	1,018	0,196 a	1,111 a	113,08 a
Rot-S/M	30,83	4,72 ab	26,06	1,012	0,182 ab	1,033 ab	104,37 ab
F(culturas)	0,72 ^{ns}	16,28**	0,06 ^{ns}	0,75 ^{ns}	5,59**	6,29**	14,18**
F(interação)	0,01 ^{ns}	2,74 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,61 ^{ns}	1,66 ^{ns}	2,33 ^{ns}
C. Nativo	30,44	4,58	25,86	1,00	0,177	1,000	100,00
C.V. (%)	9,43	15,77	13,66	9,43	13,99	13,74	10,03

* Tukey a 5%. ** Teste F a 5%.^{ns} Não significativo pelo teste F a 5%.

Devido a pequena variação nos estoques de COT e COam, o cálculo do IMC basicamente representou o mesmo comportamento observado sobre os estoques de COp analisados anteriormente, inclusive com valores de teste F e diferença mínima significativa pelo teste Tukey, ambos a 5 %, igualmente semelhantes. No entanto, nota-se que a pequena variação ocorrida nos estoques de COT contribuíram para ampliar as diferenças entre os tratamentos analisados, ainda que esta não tenha sido significativa o suficiente para diferenciar totalmente os tratamentos relativos a sistemas de culturas.

Observando mais detalhadamente os componentes da fórmula que calcula o IMC, nota-se que a labilidade da MOS nos tratamentos que tiveram menor frequência de pastoreios ou não receberam animais no inverno, utilizando as pastagens como culturas de cobertura de solo foi superior ao tratamento com frequência de pastoreio mais intensiva. Da mesma maneira, a monocultura de milho apresentou labilidade superior a monocultura de soja, sendo que a rotação soja/milho apresentou comportamento intermediário aos demais tratamentos. A maior labilidade destes tratamentos citados quando comparados a labilidade do campo nativo pode ser observado no Índice de Labilidade, presente na Tabela 9.

4.4.4. Modelagem do CO

4.4.4.1. Cálculo do coeficiente de humificação do C (k_1)

O cálculo do coeficiente k_1 foi realizado a partir da análise de correlação entre os valores de C adicionados anualmente ao solo via resíduos vegetais e a variação anual dos estoques de CO em suas diferentes frações avaliadas. Desta maneira obteve-se uma equação linear que através de seu coeficiente angular forneceu os valores de k_1 para cada fração granulométrica avaliada. As figuras 12, 13 e 14, apresentam a correlação entre as adições médias anuais de C via resíduos vegetais e as taxas de variações anuais dos estoques de COT (12), COp (13) e COam (14) observados na camada 0-10 cm do solo, em função da frequência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão avaliados.

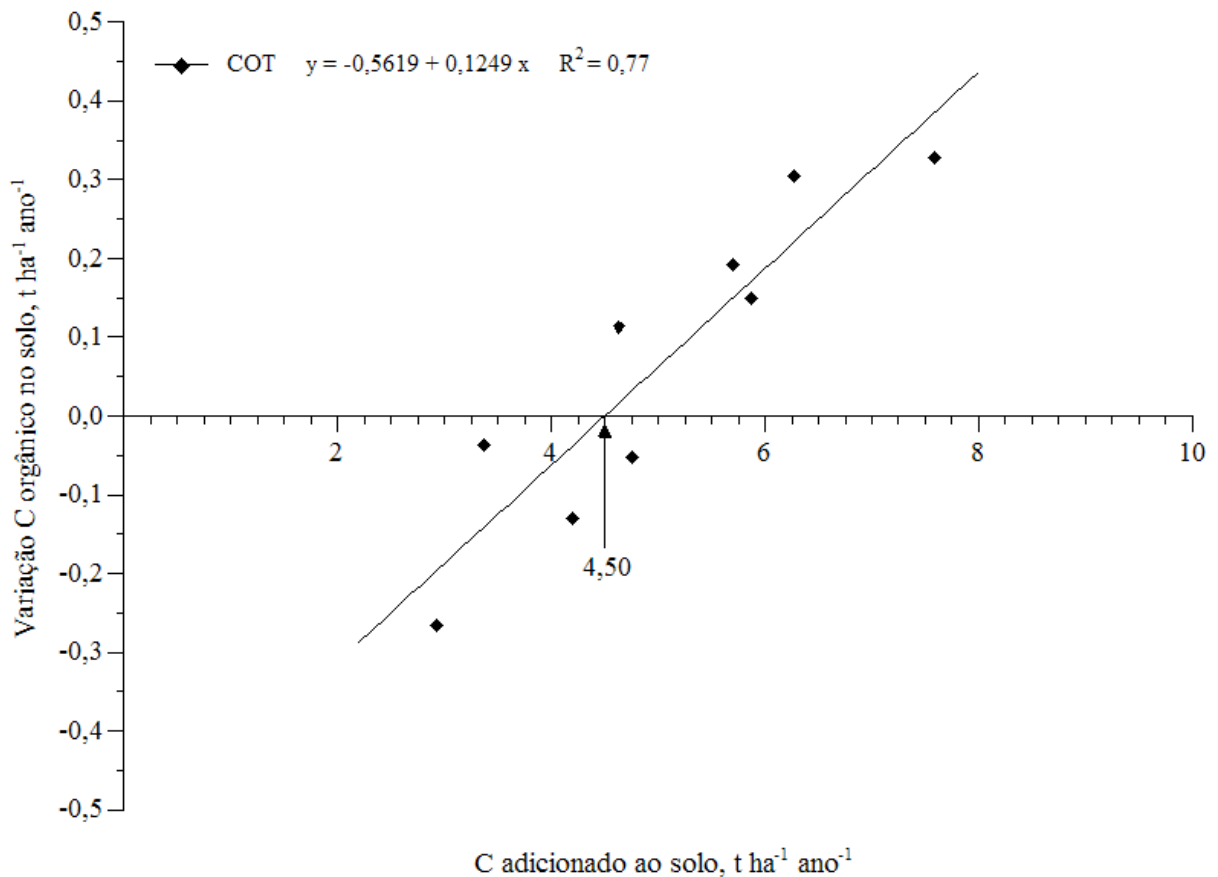


FIGURA 12. Correlação entre adições anuais de C via resíduos vegetais e variação anual dos estoques de COT na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Analisando a Figura 12, observa-se uma boa correlação entre a adição de C via resíduos vegetais e as alterações nos estoques de COT na camada 0 – 10 cm. O coeficiente k_1 fornecido pelo coeficiente angular da equação linear ajustada foi de $0,1249 \text{ ano}^{-1}$, o que indica que 12,49 % do C adicionado ao solo pelos resíduos vegetais é convertido em COT anualmente. Estes valores são bastante semelhantes aos obtidos por Lovato et al. (2004), apesar do autor ter considerado a variação nos estoques de COT na camada 0 – 17,5 cm. Esta semelhança entre os resultados de k_1 observados no presente trabalho e os dados de Lovato et al. (2004) pode ser entendida pela semelhança entre os dois solos sobre os quais foram conduzidos o experimento – um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico, com 28 % de argila na camada 0 – 20 cm, no presente trabalho e um Argissolo Vermelho Típico, com 24 %

de argila na camada 0 – 20 cm, no trabalho de Lovato et al. (2004) – e condições climáticas locais igualmente semelhantes – ambos com clima do tipo Cfa e conduzidos no estado do Rio Grande do Sul.

Observando a intersecção da equação ajustada com o eixo X, pode-se observar que a adição anual mínima de C via resíduos vegetais para que este solo mantenha constante os seus estoques de COT ($\Delta = 0 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) deve ser de 4,5 t C ano^{-1} . Da mesma maneira este resultado é semelhante aos observados por Lovato et al. (2004), que apontou este valor de adição de C como sendo de 4,2 t C ano^{-1} .

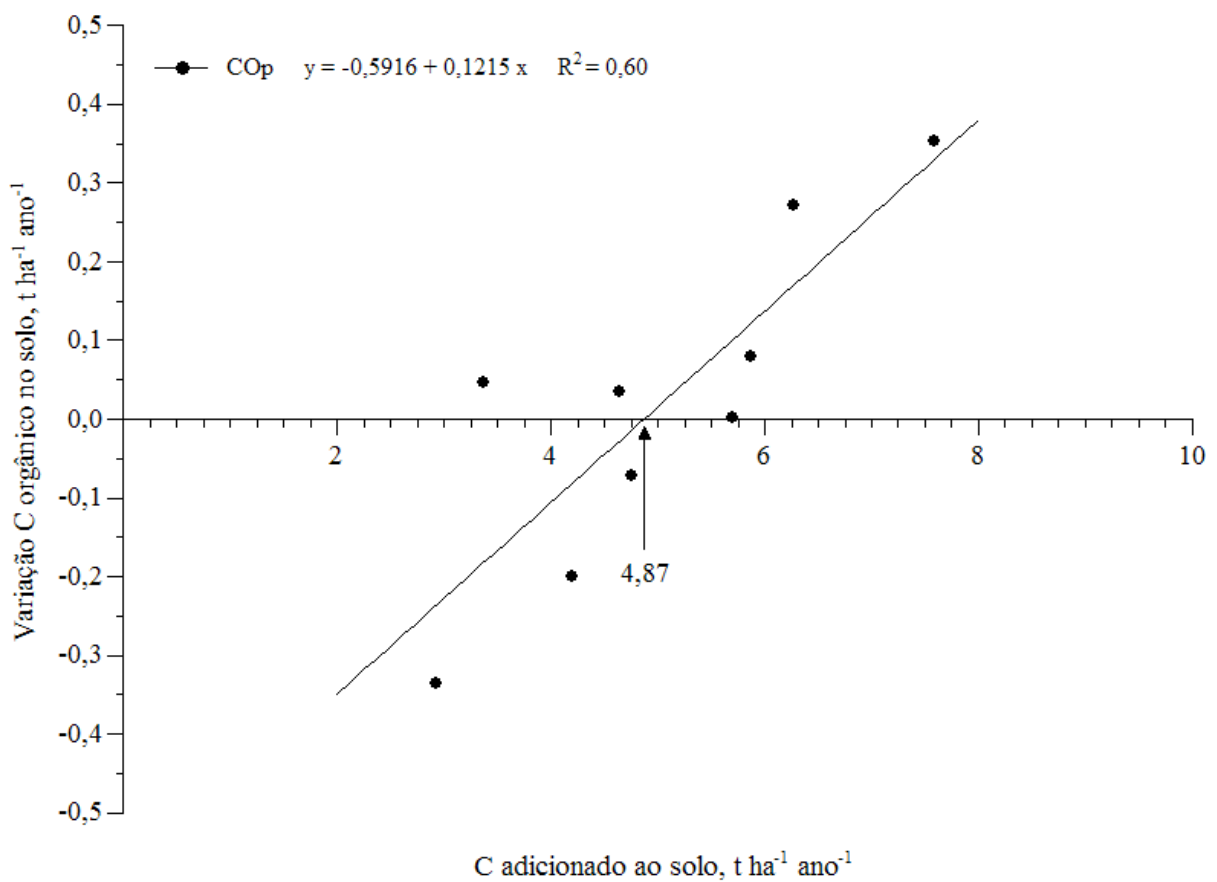


FIGURA 13. Correlação entre adições anuais de C via resíduos vegetais e variação anual dos estoques de COp na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Apesar da menor correlação entre a adição anual de C e variação nos estoques de CO_p do que a observada entre a adição anual de C e a variação nos estoques de COT, nota-se que os valores do coeficiente k_1 obtidos através do coeficiente angular da equação linear ajustada aos dados foram bastante semelhantes aos verificados em relação aos estoques de COT, embora ligeiramente inferiores. Deste modo, o coeficiente k_1 de $0,1215 \text{ ano}^{-1}$, indica que 12,15 % do C adicionado ao solo é convertido de CO_p. O menor valor do coeficiente k_1 observado para a fração particulada da MOS é plausível se considerarmos que parte do C presente nos resíduos vegetais é solúvel em água, facilmente extraível dos resíduos vegetais pela chuva e rapidamente decomposto pela ação microbiana, podendo ser emitido para a atmosfera via CO₂ ou convertido em CO de outras frações da MOS. Embora esta explicação seja teoricamente possível, pesquisas mais aprofundadas devem ser executadas a fim de confirmar estes resultados e esta explicação.

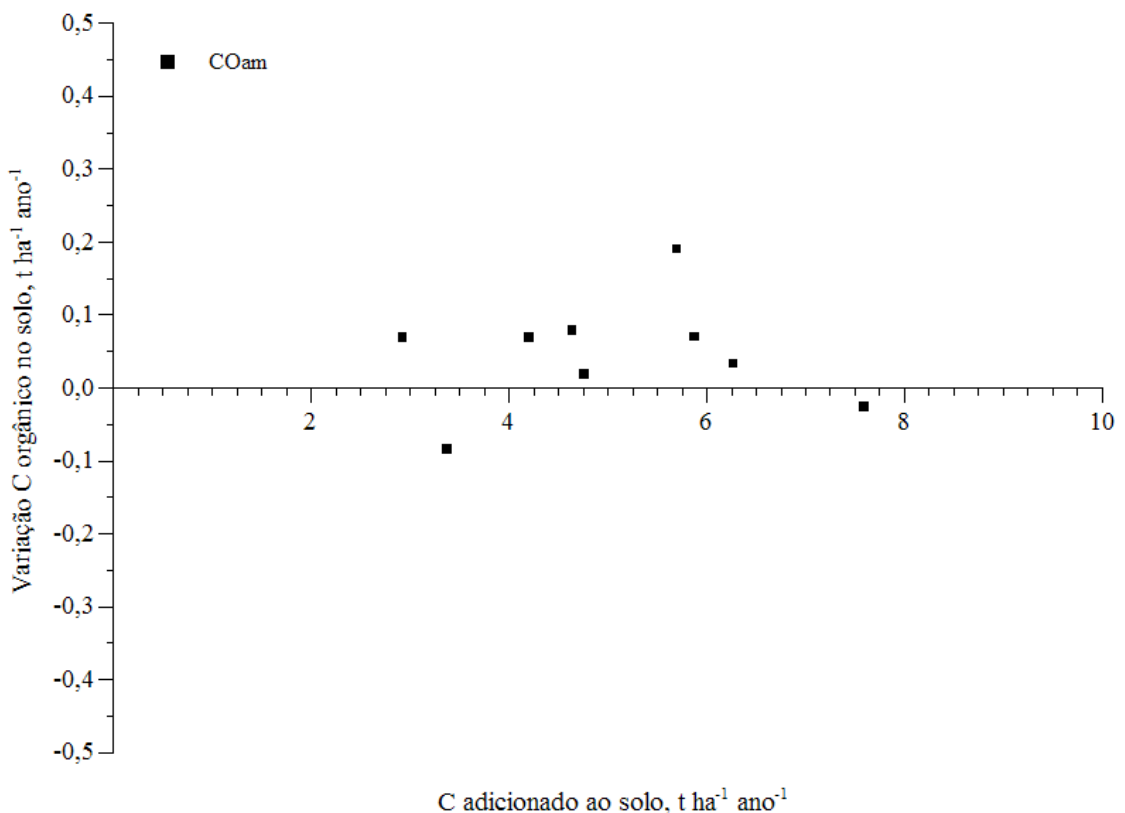


FIGURA 14. Correlação entre adições anuais de C via resíduos vegetais e variação anual dos estoques de CO_{am} na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Conforme observa-se a partir da Figura 14, não existiu correlação significativa entre a adição de C via resíduos vegetais e as variações nos estoques de COam. Isto deve-se primeiramente ao pouco tempo de execução dos experimento e da alta estabilidade desta fração da MOS, que é insensível ao manejo do solo em curtos períodos de avaliação, conforme já comentado neste trabalho e confirmado por Bayer et al. (2004). Outro fator que influenciou na baixa correlação entre adição de C e variação no COam foi a metodologia de fracionamento da MOS e determinação dos teores de CO. Pela metodologia, os valores de COam são obtidos indiretamente, pela diferença entre os estoques de COT e COp, o que contribui para menor precisão dos dados referentes a esta fração. No entanto ao conhecermos os coeficiente k_1 e os demais componentes da equação 1 das outras frações da MOS avaliadas, é possível estimar através de um artifício de cálculo, valendo-se também da equação 5, o coeficiente k_1 aplicável à modelagem do COam. O coeficiente k_1 calculado para a modelagem do COam foi de $0,0936 \text{ ano}^{-1}$, o que representa uma taxa de conversão do C adicionado em CO desta fração da MOS de 9,36 %. Maiores detalhes de como foi calculado este coeficiente serão apresentados no próximo item. Porém, apesar de obtido através de um artifício de cálculo, o coeficiente k_1 de $0,0936 \text{ ano}^{-1}$ proposto para o COam é coerente, visto que a maior parte dos resíduos vegetais adicionados ao solo são preferencialmente incorporados pela fração particulada da MOS, sendo que apenas uma pequena fração é decomposta e incorporada diretamente na fração associada a minerais do solo. A incorporação do C adicionado ao solo pela COam é dependente, então, da adição de C ao solo, da transformação deste em COp e da mineralização deste e sua posterior incorporação ao COam. Aplicando-se a equação 4 pode-se calcular a adição anual de C via resíduos vegetais para manter constantes os estoques de CO nesta fração, de maneira que esta deve ser de $4,45 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C.

4.4.4.2. Cálculo do coeficiente k_2 , C_e , $t_{1/2}$ e C observado e estimado no último ano do experimento.

A Tabela 10, demonstra os resultados do cálculo do coeficiente k_2 , C_e , $t_{1/2}$, **TMP** e C observado e estimado no último ano do experimento, para todas as frações de CO avaliadas. Considerou-se o mesmo coeficiente k_2 para todas as combinações

de tratamentos avaliadas, alterando-se somente em função da fração da MOS avaliada. O C_e e estimado para o último ano do experimento, foi calculado em função de cada combinação dos tratamentos dentro de cada fração da MOS avaliada. O $t_{1/2}$ e o **TMP** foi calculado em função do coeficiente k_2 de cada fração do CO avaliado.

TABELA 10. Adições de C (A), carbono adicionado convertido em CO (Ak_1), CO observado, CO estimado, CO na estabilidade (C_e), coeficiente k_2 e tempo de meia vida ($t_{1/2}$) e tempo médio de permanência (TMP) dos estoques de COT, COp e COam na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamento	A	Ak_1	CO		C_e	k_2	$t_{1/2}$	TMP	
			obs.	est.					
			Mg ha ⁻¹				anos	anos	
COp									
SP	Mon-S	5,69	0,69	4,58	4,89	5,35	0,1292	5	8
	Mon-M	7,59	0,92	5,99	5,61	7,13	0,1292	5	8
	Rot-S	6,27	0,76	5,66	5,11	5,89	0,1292	5	8
P28	Mon-S	3,37	0,41	4,77	4,01	3,17	0,1292	5	8
	Mon-M	5,87	0,71	4,90	4,96	5,52	0,1292	5	8
	Rot-S	4,63	0,56	4,72	4,49	4,36	0,1292	5	8
P14	Mon-S	2,92	0,35	3,23	3,84	2,75	0,1292	5	8
	Mon-M	4,75	0,58	4,29	4,54	4,47	0,1292	5	8
	Rot-S	4,20	0,51	3,80	4,33	3,84	0,1292	5	8
COam									
SP	Mon-S	5,69	0,53	26,64	26,31	33,10	0,0161	43	62
	Mon-M	7,59	0,71	25,77	27,00	44,10	0,0161	43	62
	Rot-S	6,27	0,59	26,01	26,52	36,43	0,0161	43	62
P28	Mon-S	3,37	0,32	25,53	25,56	19,57	0,0161	43	62
	Mon-M	5,87	0,55	26,14	26,38	34,12	0,0161	43	62
	Rot-S	4,63	0,43	26,18	25,93	26,94	0,0161	43	62
P14	Mon-S	2,92	0,27	26,15	25,31	16,99	0,0161	43	62
	Mon-M	4,75	0,45	25,94	25,97	27,64	0,0161	43	62
	Rot-S	4,20	0,39	26,13	25,77	24,41	0,0161	43	62
COT									
SP	Mon-S	5,69	0,71	31,22	31,01	38,44	0,0185	37	54
	Mon-M	7,59	0,95	31,76	31,92	51,21	0,0185	37	54
	Rot-S	6,27	0,78	31,67	31,29	42,30	0,0185	37	54
P28	Mon-S	3,37	0,42	30,30	29,89	22,73	0,0185	37	54
	Mon-M	5,87	0,73	31,04	31,10	39,63	0,0185	37	54
	Rot-S	4,63	0,58	30,90	30,50	31,29	0,0185	37	54
P14	Mon-S	2,92	0,37	29,38	29,68	19,73	0,0185	37	54
	Mon-M	4,75	0,59	30,23	30,56	32,10	0,0185	37	54
	Rot-S	4,20	0,52	29,93	30,29	28,35	0,0185	37	54

O coeficiente anual de perdas de carbono no solo (k_2) foi calculado a partir da equação 3, utilizando-se os teores iniciais de carbono no solo C_o e da quantidade de C vegetal adicionado ao solo e efetivamente convertido em CO ($A.k_1$).

Pela Tabela 10, observa-se os coeficientes k_2 para cada fração da MOS, expressas pelos estoques de COp, COam e COT. Verifica-se que o valor de k_2 determinado para o COT foi de $0,0185 \text{ ano}^{-1}$, valor bastante próximo ao obtido por Lovato et al. (2004) para a taxa de mineralização da MOS no sistema plantio direto. Este coeficiente k_2 indica que 1,85 % dos estoques de COT é mineralizado anualmente.

O coeficiente k_2 determinado para a fração particulada da MOS foi de $0,1292 \text{ ano}^{-1}$, indicando que 12,92 % dos estoques de COp são mineralizados ou decompostos e incorporados em outros compartimentos da MOS de maior grau de estabilidade. A semelhança entre os coeficientes k_1 e k_2 da fração particulada demonstram o alto grau de dependência desta fração da MOS a adição de C ao solo via resíduos vegetais para a manutenção de seus estoques.

O cálculo do coeficiente k_2 para a fração associada a minerais da MOS exigiu uma metodologia de cálculo diferente, visto que não se conhecia a taxa de humificação do C adicionado ao solo (k_1) para este compartimento. Assim, o coeficiente k_2 foi calculado através da equação 5. Primeiramente, calculou-se o C_e do COam pela diferença entre o C_e do COT e C_e do COp. Logo após dividiu-se a diferença entre os valores de C_e e C_o do COam pela metade, para saber o estoque de COam no $t_{1/2}$. A seguir, calculou-se anualmente os estoques de COT e COp pelo modelo matemático ajustado a cada fração através da equação 1. Depois subtraiu-se os valores modelados de COT e COp até se achar um valor igual ao estoque de COam no $t_{1/2}$. Assim soube-se o valor de $t_{1/2}$ para os estoques de COam. Aplicando-se a fórmula 5, obteve-se o valor de k_2 para a fração associada a minerais. A seguir calculou-se o coeficiente k_1 para o COam através da equação 4. O coeficiente k_2 obtido para a fração associada a minerais foi de $0,0161 \text{ ano}^{-1}$ e o coeficiente k_1 para a mesma fração foi de $0,0936 \text{ ano}^{-1}$ conforme comentado no item 4.3.4.1.

Observa-se que o valor do coeficiente k_2 do COam, embora obtido através de cálculo e da modelagem de outras duas frações, o que contribui para aumentar o erro desta determinação, é lógico e bastante plausível, visto que esta fração da MOS é mais estabilizada e protegida e portanto apresenta uma ciclagem mais lenta de seus estoques de CO. Da mesma maneira, apesar de mais baixo, que o coeficiente

k_2 do COT, o coeficiente k_2 do COam deve ser próximo ao do COT, visto que a maior parte do COT é composto pela fração associada a minerais.

Com base nos coeficientes k_2 calculados para cada fração da MOS, calculou-se o $t_{1/2}$ e o **TMP** referente aos estoques de COp, COam e COT. Aquele representa o tempo decorrido para que os estoques de cada fração da MOS atinjam a metade da diferença entre os estoques na estabilidade e os originais do solo e este indica o tempo médio de permanência do C adicionado ao solo neste sistema. O $t_{1/2}$ foi de 5, 43 e 37 anos para os estoques de COp, COam e COT, respectivamente, enquanto que o **TMP** foi de 8, 62 e 54 anos, da mesma maneira. Estes resultados indicam a velocidade de alteração dos estoques de cada fração e tem por base a taxa de ciclagem do CO de cada um. Para o COp o menor $t_{1/2}$ e **TMP** indica também a maior sensibilidade desta fração ao manejo do solo, enquanto que para o COam, indica que as alterações nos estoques desta frações necessitam de maior tempo para serem perceptíveis.

Da mesma maneira, calculou-se os estoques de CO na estabilidade em função dos coeficiente k_2 de cada fração e da combinação de adições de C em cada sistema de culturas e frequência de pastoreios empregada. Os estoques de CO na estabilidade variaram de 19,23 a 51,21 Mg ha⁻¹ para o COT, quando se utilizou a monocultura de soja com frequência de pastoreios de 14 dias e monocultura de milho em áreas que não receberam pastoreios, respectivamente. Os estoques de COp variaram de 2,75 a 7,13 Mg ha⁻¹, enquanto que os estoques de COam variaram de 16,99 a 44,1 Mg ha⁻¹, para os mesmos tratamentos.

Estes resultados de C_e refletem a diferença de adição de resíduos entre os tratamentos, o que resultará ao longo do tempo em áreas com diferentes níveis de qualidade do solo e estoques de CO no solo, o que pode vir a representar um grande impacto sobre a sustentabilidade da atividade agrícola.

4.4.4.3. Simulação matemática dos estoques de CO para 20 anos.

As Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20 demonstram a simulação da evolução dos estoques de COp, COam e COT, em função da frequência de pastoreio e sistema de culturas, durante os 20 anos seguintes ao início do manejo do solo, com base no modelo matemático de modelagem da MOS.

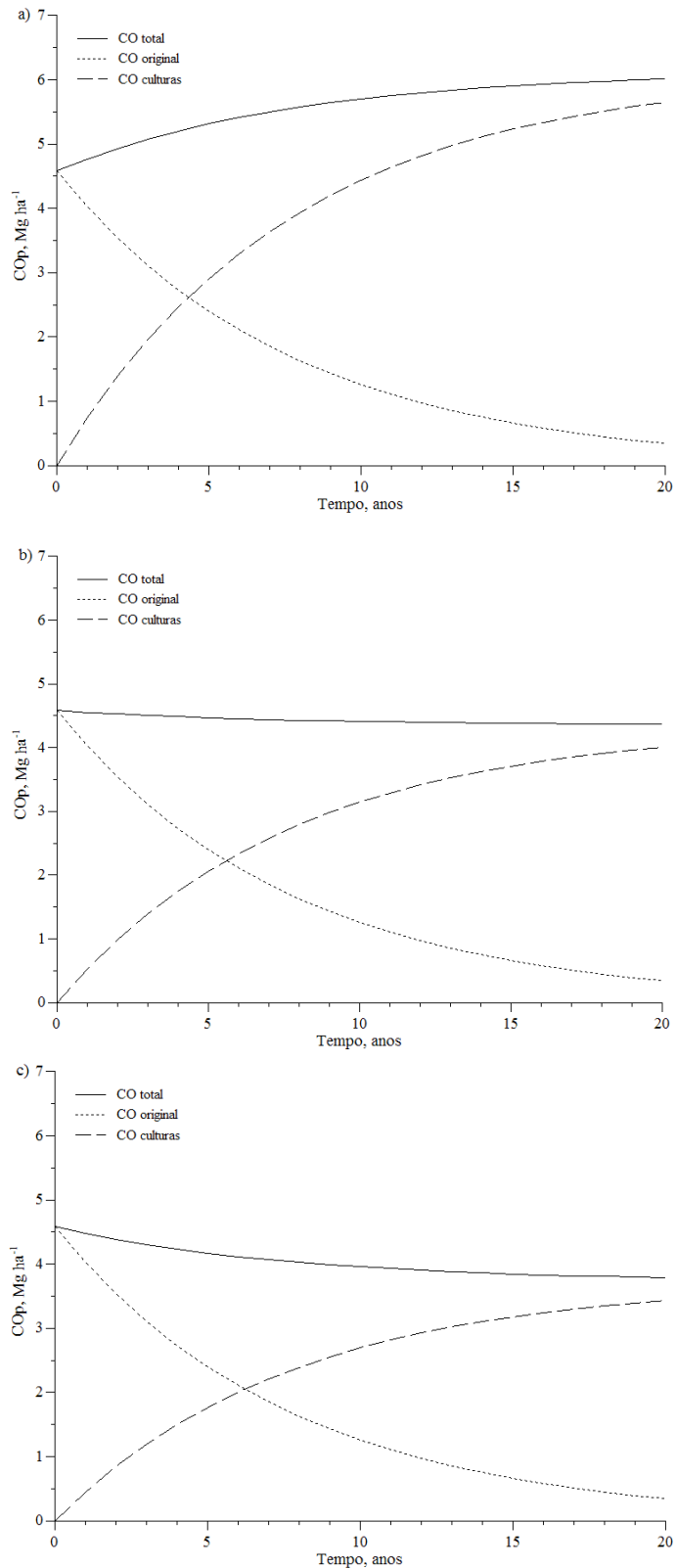


FIGURA 15. Simulação dos estoques de COp, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno. SP (a), P28 (b) e P14 (c). ACR, Jari-RS, 2005.

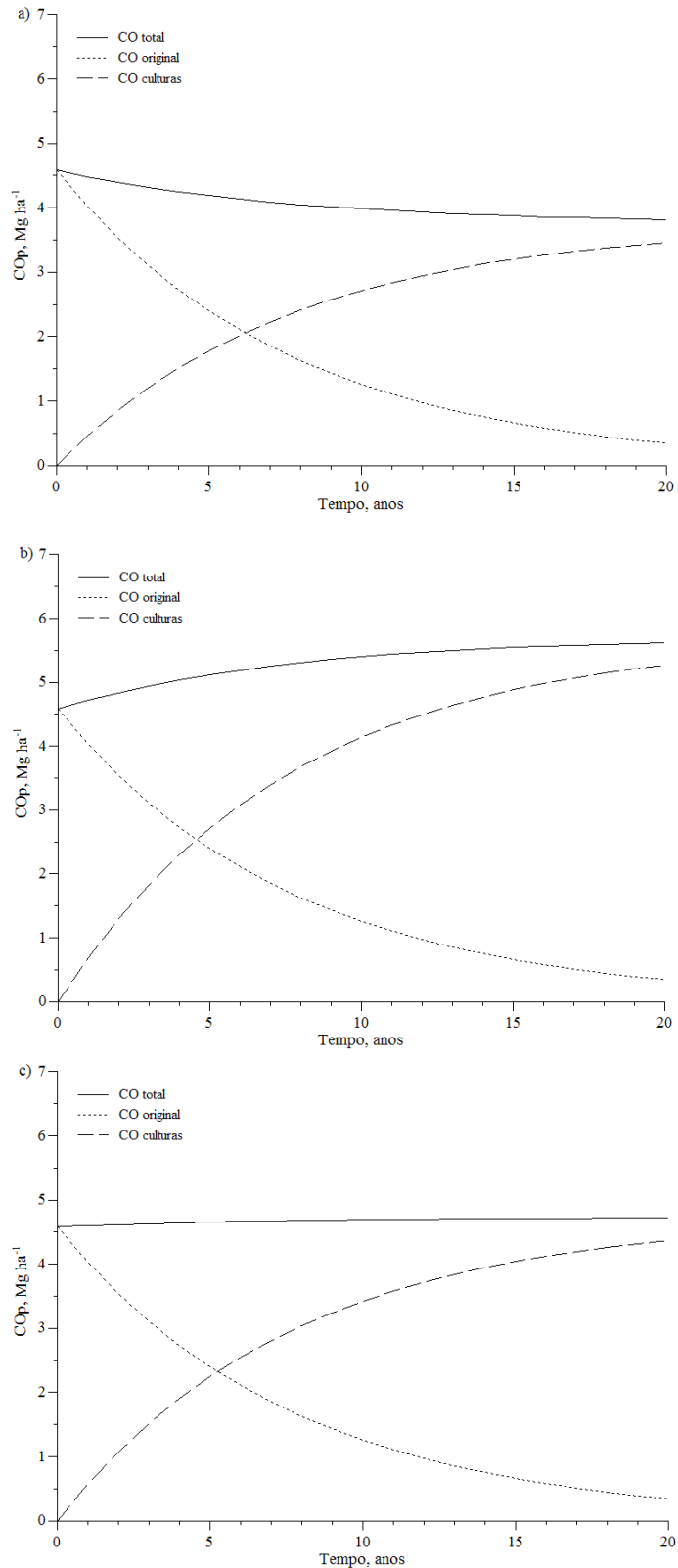


FIGURA 16. Simulação dos estoques de COp, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função do sistema de culturas. Mon-S (a), Mon-M (b) e Rot-S/M (c). ACR, Jari-RS, 2005.

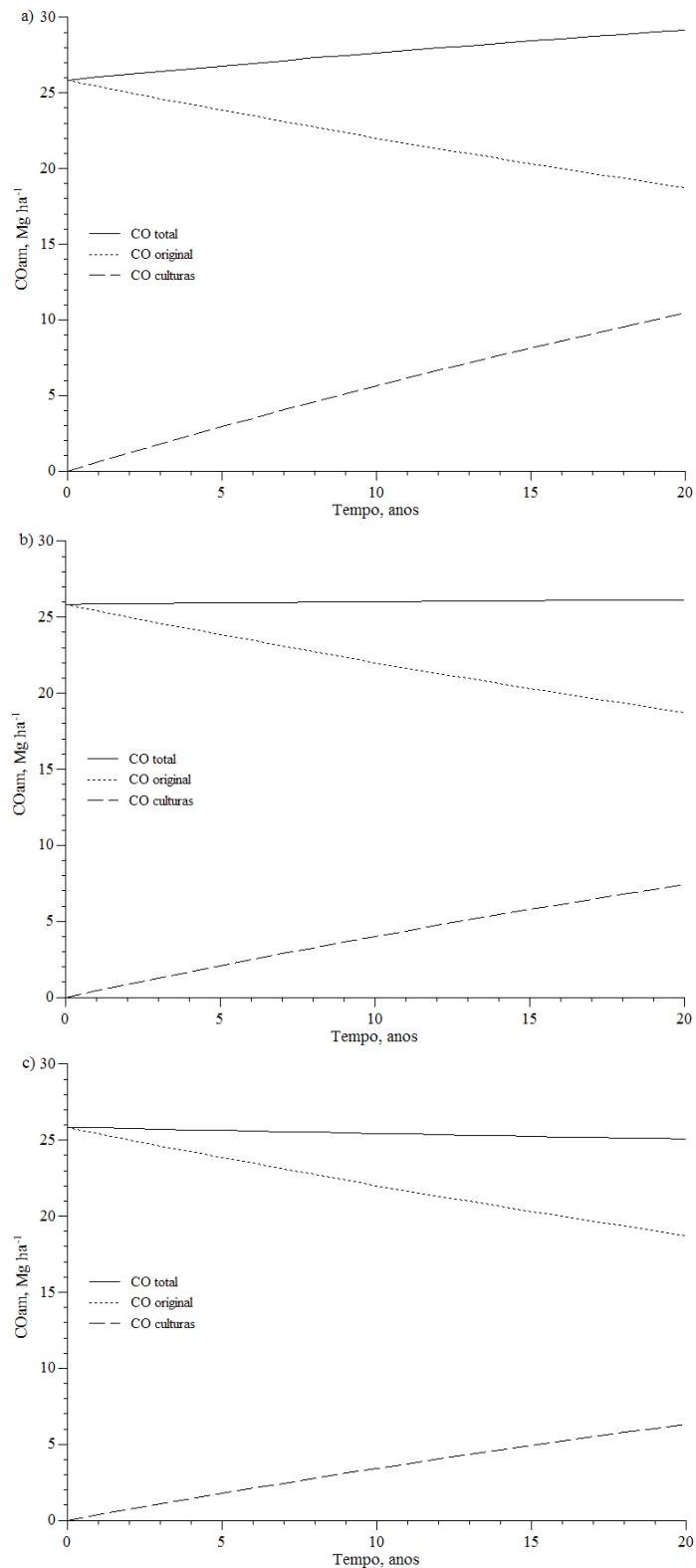


FIGURA 17. Simulação dos estoques de CO_{am}, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno. SP (a), P28 (b) e P14 (c). ACR, Jari-RS, 2005.

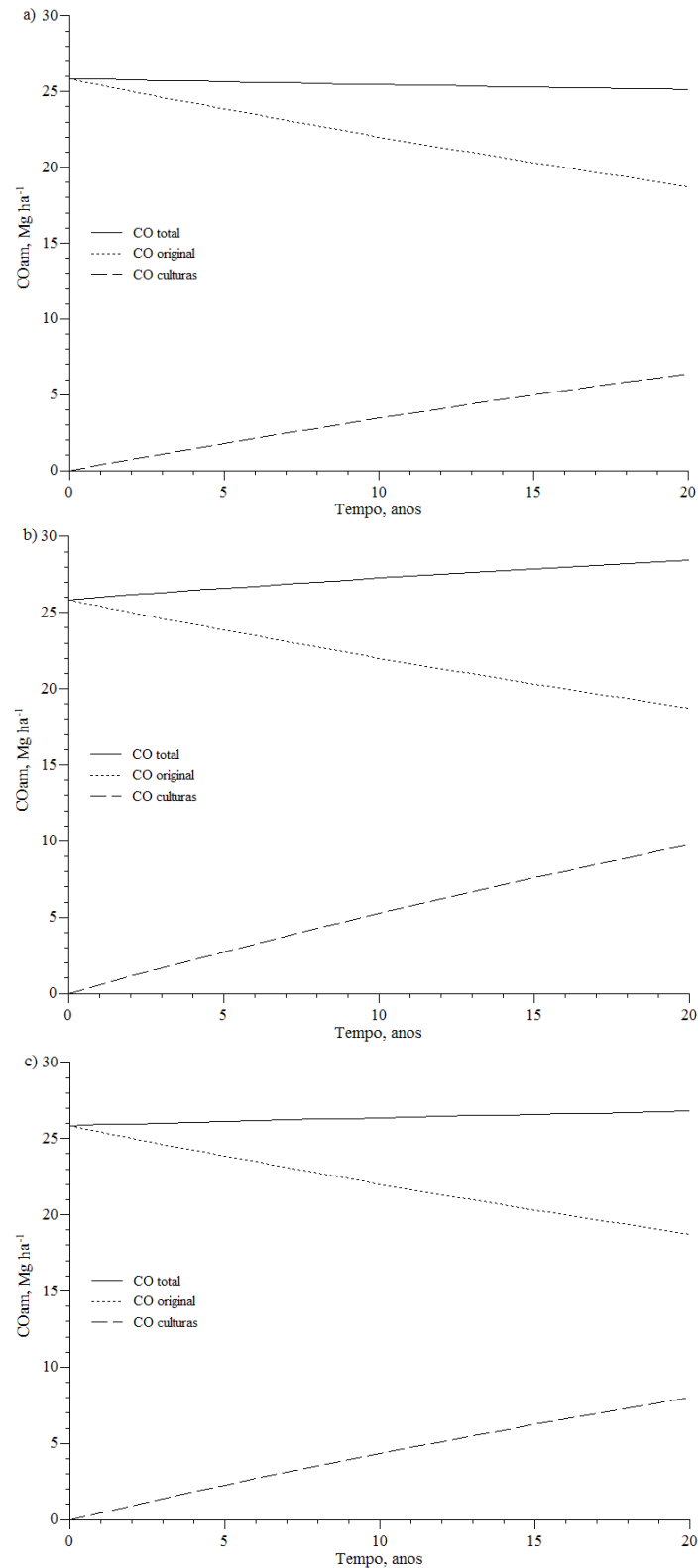


FIGURA 18. Simulação dos estoques de CO_{am}, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função do sistema de culturas. Mon-S (a), Mon-M (b) e Rot-S/M (c). ACR, Jari-RS, 2005.

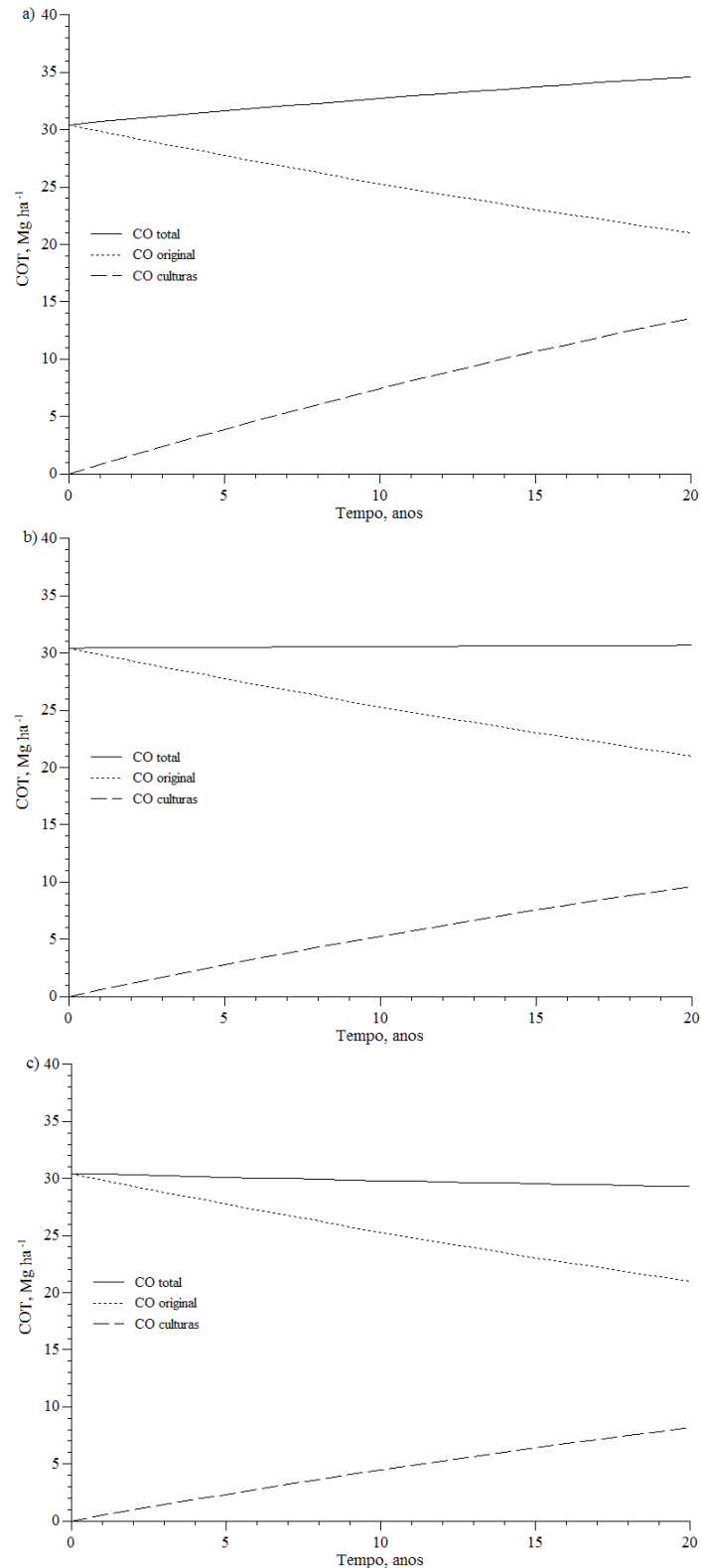


FIGURA 19. Simulação dos estoques de COT, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno. SP (a), P28 (b) e P14 (c). ACR, Jari-RS, 2005.

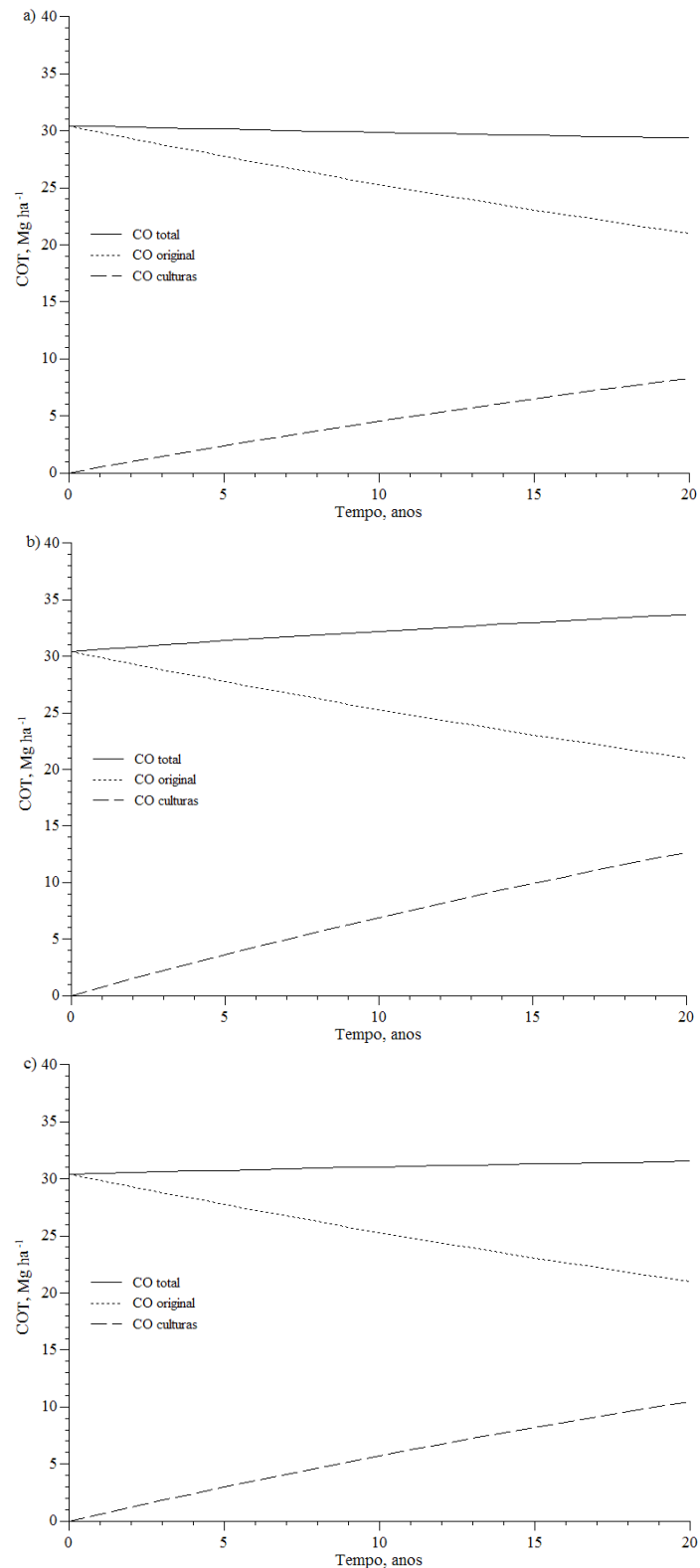


FIGURA 20. Simulação dos estoques de COT, considerando o C original remanescente e C proveniente da culturas na camada 0 – 10 de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função do sistema de culturas. Mon-S (a), Mon-M (b) e Rot-S/M (c). ACR, Jari-RS, 2005.

A modelagem dos estoques de CO nas diferentes compartimentos da MOS foi realizada através da equação 1, considerando o estoques totais de C em cada fração da MOS. Para a modelagem dos estoques originais do CO em cada fração e da contribuição das culturas nos estoques de CO, procedeu-se o desmembramento da equação 1 em duas partes. A primeira, $C_{orig} = C_o e^{-kt}$, demonstra o decaimento exponencial dos estoques originais de CO do solo, enquanto que a segunda parte da equação, $C_{cult} = A.k_1/k_2 (1 - e^{-kt})$, demonstra o acúmulo de CO no solo proveniente da decomposição dos resíduos vegetais depositados ao solo pelas culturas implantadas.

Com base nas Figuras 15 e 16, observa-se a grande variação nos estoques de COp que ocorre já nos primeiros anos de cultivo. Pelas mesmas figuras, observa-se que em aproximadamente 4 a 6 anos de manejo do solo, o CO proveniente da decomposição do resíduo vegetal aportado ao solo pelas culturas implantadas, representa a metade do estoques de CO desta fração, chegando a representar mais de 90 % do CO desta fração ao final de 20 anos de condução do manejo de solo e sistemas de culturas.

Pela Figura 15, observa-se que conforma a freqüência de pastoreios adotadas durante o inverno, ao final dos 20 da simulação, observa-se o aumento de aproximadamente 31 % dos estoques de COp quando não se realiza pastoreios (SP) em relação aos estoques originais. Nas áreas pastejadas, ocorreu diminuição dos estoques de COp, embora na freqüência de 28 dias (P28), estes representem 95 % do estoque original, enquanto que na freqüência de 14 dias (P14), estes representem apenas 82 % dos valores originais.

A partir da Figura 16, observa-se a influência das culturas de verão sobre os estoques de COp. Na média dos três sistemas de pastoreio, as áreas de Mon-S, ao final do período simulado, apresentaram apenas 83 % dos estoques originais de COp, enquanto que os outros sistemas de culturas propiciaram o aumento destes estoques, da ordem de 22 e 3 % aproximadamente, para os sistemas de culturas Mon-M e Rot-S/M, respectivamente.

Obviamente a combinação dos tratamentos maximiza o acúmulo ou a perdas destes estoques, sendo que, por exemplo, a combinação de altas freqüências de pastoreios (P14) com a monocultura de soja, reduz os estoques de COp a cerca de 63 % do original, enquanto que as áreas que não receberam pastoreios e tiveram a cultura do milho em monocultura no verão, apresentaram cerca de 51 % mais

carbono ao final do período de 20 anos, em relação aos estoques observados no solo sob condição original.

Observando as variações nos estoques de CO_{am} simulados para 20 anos de manejo após a conversão do solo sobre campo nativo em área de exploração agropecuária a partir das Figuras 17 e 18, nota-se que embora menos sensíveis, ao final de 20 anos, estes diferem dos estoques originais de CO_{am} do solo. Da mesma maneira que para a fração CO_p, as áreas sem pastoreio aumentaram em 12 % os estoques de CO_{am}, enquanto que nas áreas com maior frequência de pastoreio, os estoques de CO_{am} reduziram-se a cerca de 96 % dos valores originais. Por outro lado, as áreas sob pastoreio a cada 28 dias, que tiveram redução nos estoques de CO_p, aumentaram em 1 % os estoques de CO_{am}, mantendo-se bastante semelhantes aos originais.

Pela Figura 18, observa-se que as áreas de monocultura de soja continuaram apresentando redução dos estoques de CO_{am} ao final dos 20 anos simulados pelo modelo matemático, representando cerca de 97 % dos valores originais na média das três frequências de pastoreios. Os sistemas de culturas com Mon-M e Rot-S/M, causaram efeito contrário, aumentando em 10 e 3 % os estoques de CO_{am}, respectivamente. Ao final de 20 simulados, observa-se que o CO proveniente da decomposição do C aportado pelas culturas ao solo, chega a representar entre 25 e 35 % dos estoques totais da fração CO_{am}.

Embora mais sensíveis do que os estoques de CO_{am}, o COT apresentou tendência semelhante a descrita anteriormente, conforme pode-se notar a partir das Figuras 19 e 20. Pela Figura 19, observa-se que as áreas sem pastoreio apresentaram 13 % mais carbono que no solo em suas condições originais, Nas áreas que receberam pastoreios a cada 28 dias, os estoques de COT permaneceram bastante semelhantes aos originais, com o aumento de apenas 0,78 %. Porém nas áreas que receberam maior intensidade de pastoreio, os estoques de COT foram reduzidos a aproximadamente 96 % do original.

Observando a Figura 20, nota-se que a monocultura de soja reduziu os estoques de COT a cerca de 96 % dos originais, enquanto que nas áreas sob Mon-M ou Rot-S/M, os estoques de COT foram aumentados em cerca de 10 e 3 % ao final de 20 anos do período simulado. O CO proveniente da culturas variou entre 27 e 39 % dos valores totais de COT.

Quanto aos estoques de COT, a combinação de alta freqüência de pastoreio com a monocultura de soja, reduziu seus estoques a 89 % do original, enquanto que as áreas sem pastoreios e cultivadas com milho em monocultura, tiveram um aumento de 21 % dos estoques de COT.

4.4.4.4. Seqüestro ou Emissão ou CO₂

A Figura 21, demonstra o saldo líquido de C-CO₂ ao final dos 4 anos de condução do experimento em função da freqüência de pastoreio adotada sobre as pastagens de inverno e o sistema de culturas de verão empregado.

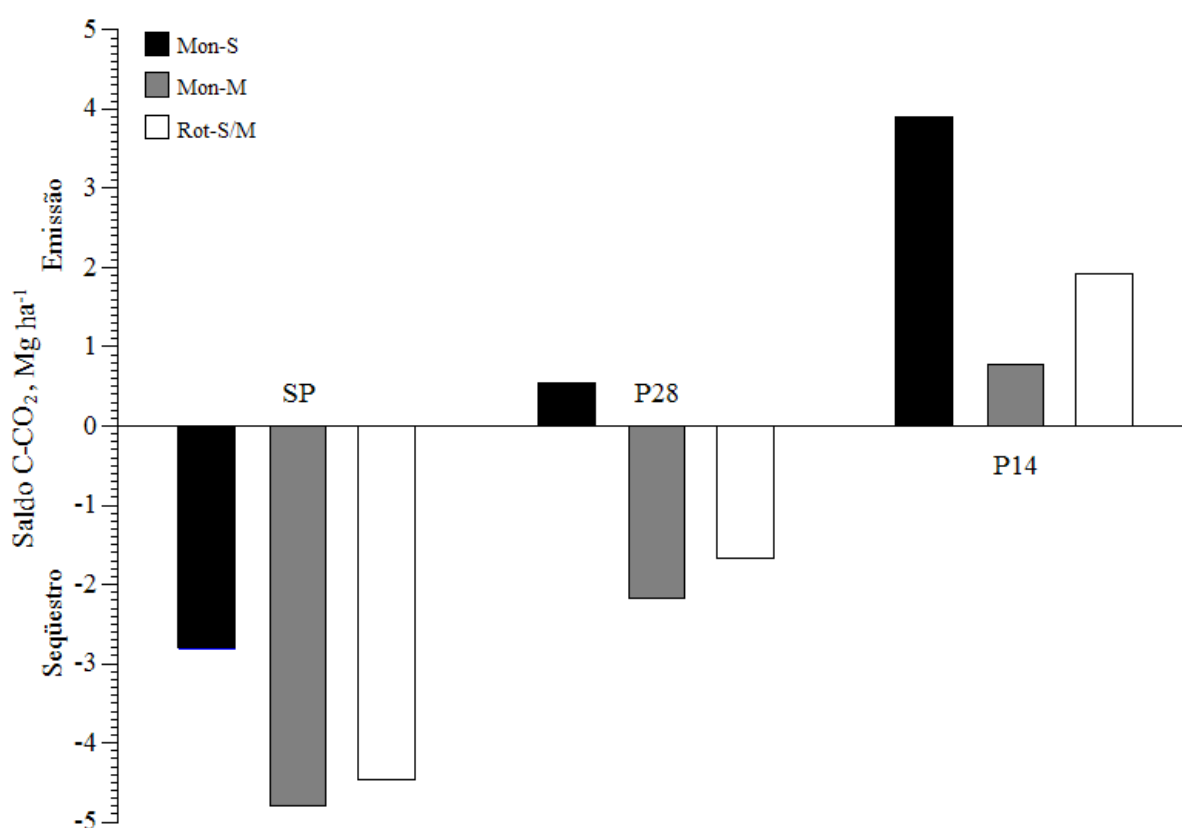


FIGURA 21. Saldo líquido acumulado de seqüestro ou emissão de C-CO₂ de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico, após 4 anos de condução do experimento em função da freqüência de pastoreio sobre as pastagens de inverno e sistemas de culturas de verão empregado. ACR, Jari – RS, 2005.

Pela Figura 21, observa-se que as áreas que não receberam pastoreios no inverno seqüestraram entre 3 e 5 Mg ha⁻¹ de C-CO₂ em quatro anos de cultivo. As áreas que receberam pastoreio mais intensivo (P14), emitiram carbono para a atmosfera, independente do sistema de culturas utilizado. Enquanto que as áreas que receberam uma freqüência mais adequada de pastoreio tiveram condições de seqüestrar carbono quando utilizaram o sistema de culturas o milho em monocultura ou rotação com a soja. A monocultura da soja apresentou menor potencial de seqüestro de carbono ou maior potencial de emissão de carbono quando associada a áreas sem pastoreio ou sob pastoreios, respectivamente.

As maiores taxas de seqüestro de C-CO₂ foram observadas nas áreas sem pastoreio cultivadas com milho em monocultura, as quais foram de 1,2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, totalizando 4,8 Mg ha⁻¹ de C-CO₂ seqüestrado ao final de quatro anos. Por outro lado, as maiores emissões de C-CO₂ foram observadas na áreas que receberam maior intensidade de pastoreio no inverno e a monocultura da soja durante o verão, com uma taxa anual de emissão de C-CO₂ de 0,97 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, totalizando 3,90 Mg ha⁻¹ emitidas ao final de 4 anos de cultivo.

A maior taxa de seqüestro de C-CO₂ observada por Lovato (2001) foi de 2,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, num sistema de culturas aveia+vica/milho+caupi adubado com 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio, sob plantio direto. Este sistema de culturas proporcionou um aporte médio de C ao solo de 7,83 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ durante 13 anos de condução do experimento. Tendo em vista que neste trabalho, o tratamento SP Mon-M, apresentou um aporte médio de C ao solo de 7,59 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, seria lógico que as taxas de seqüestro de C-CO₂ fossem semelhantes. No entanto, esta diferença pode ser explicada, em partes, pela camada de solo avaliada, sendo que Lovato (2001) avaliou a camada 0 – 17,5 cm do solo, enquanto que neste trabalho, a camada avaliada foi de 0 – 10 cm do solo. Por outro lado, as principais alterações nos estoques de CO ocorreram deste trabalho ocorreram nas camadas mais superficiais do solo, o que indica que com o passar do tempo, quando as camadas mais inferiores começarem a ser afetadas pelos tratamentos, pode-se conjecturar que estas taxas de seqüestro de CO₂ em cada trabalho irão se aproximar.

De qualquer maneira, observa-se que os tratamentos com alta adição de C ao solo, por receberem pastoreios numa freqüência adequada ou que não os receberam e que tiveram culturas de verão com alta produção de palha possuem potencial para mitigar os problemas do efeito estufa pelo seqüestro de CO₂.

4.4.4.5. Indicadores de QS e adequação ao modelo teórico proposto

A seguir serão discutidos os dados obtidos durante o experimento quanto a sua adequação ao modelo teórico de QS proposto. A Figura 22, demonstra o incremento relativo dos estoques de COT, COp e COam e do IMC na camada 0 – 10 cm em função do sistema de culturas de verão e freqüência de pastoreio sobre as pastagens de inverno empregada e a adequação de cada um ao modelo teórico de QS proposto para este trabalho.

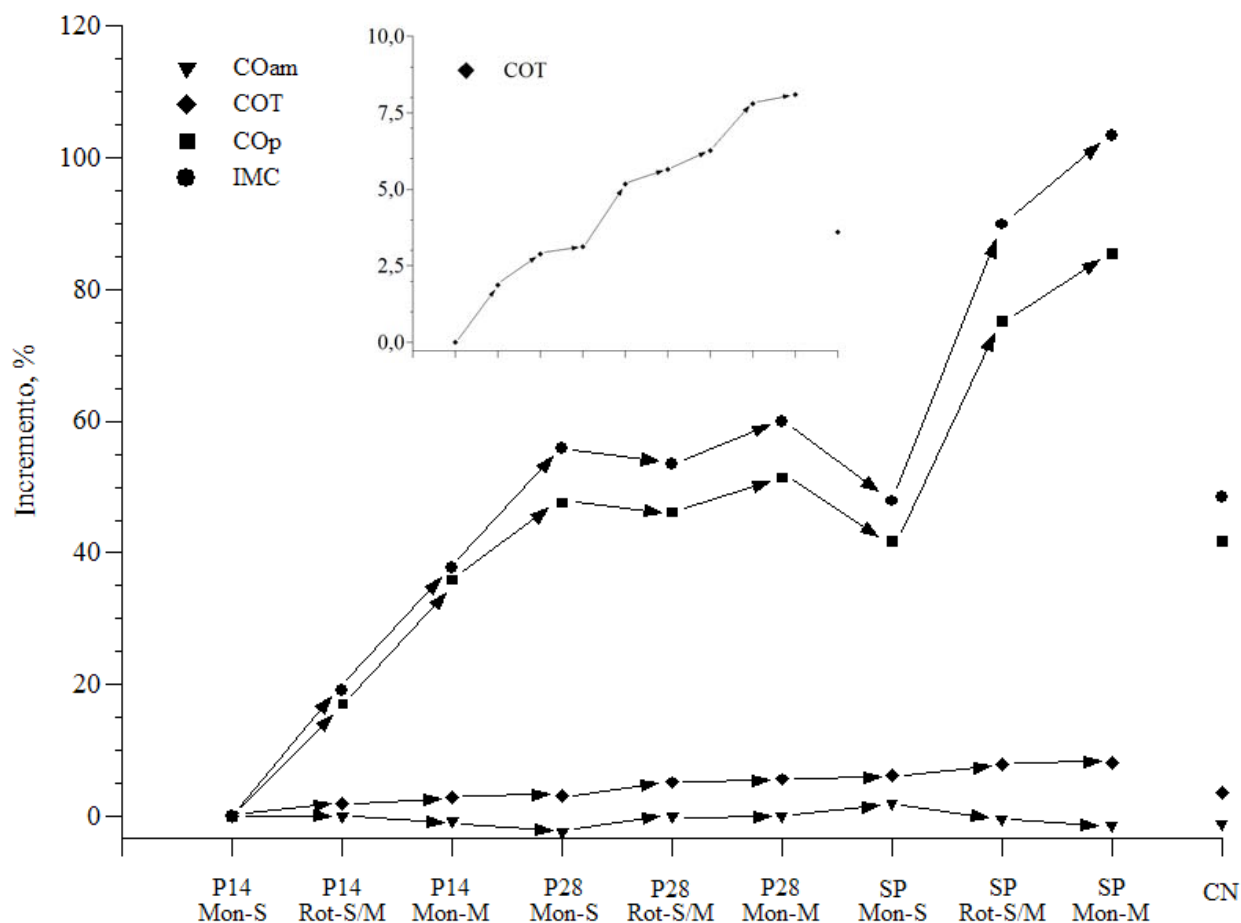


FIGURA 22. Incremento relativo dos estoques de COp, COam e COT e do IMC, na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico, segundo a freqüência de pastoreios empregada no inverno e sistema de culturas de verão em relação ao tratamento P14 Mon-S. ACR, Jari – RS, 2005.

Observa-se uma boa correlação entre os incrementos percentuais dos estoques de COT e COp e do IMC com o modelo teórico proposto que ordenava os tratamentos em função de sua qualidade do solo. Os estoques de COT foram os que melhor representaram a ordenação teórica proposta, com uma correlação de 96 % com o modelo teórico. Por outro lado, os estoques de CO da fração associada a minerais não se correlacionaram com o modelo teórico, devido a baixa sensibilidade desta fração em curtos períodos de manejo. A correlação entre o modelo teórico e os estoques de COp e o IMC foram de 81 %, porém, pode-se notar a maior sensibilidade da fração particulada da MOS ao histórico de manejo do solo, tendo em vista a maior variação entre os tratamentos, que foi da ordem de 85 % para esta fração e de apenas 8,1 % para os estoques de COT. Pode-se ainda avaliar que o IMC foi o parâmetro avaliado que foi mais afetado pelos manejo do solo e aplicação dos tratamentos. Isto deve-se ao fato de que o IMC leva em consideração as alterações nos estoques de todas as frações da MOS, o que leva a uma maior discriminação dos tratamentos do que se avaliarmos os efeitos do histórico de manejo sobre apenas um compartimento da MOS.

A hierarquização dos tratamentos em dois níveis de importância, com a frequência de pastoreios tendo efeito dominante sobre o sistemas de culturas não verificou-se válido. Observa-se que o principal efeito dos tratamentos quanto a melhoria dos níveis de QS, deu-se pela quantidade de C adicionada. Neste sentido, tanto a frequência de pastoreio como o sistema de culturas tiveram efeito semelhante sobre o aporte de C ano solo, razão pela qual pode-se classificar os dois tratamentos como num mesmo nível de atuação sobre a QS , se considerarmos os incrementos médios dos tratamentos. Porém, analisando as taxas de incrementos sobre os estoques de COT em função dos tratamentos, podemos observar que a inclusão do milho no sistema de culturas possibilitou grande melhoria destes em relação as áreas mantidas sob monocultura de soja, o que reforça a importância da utilização desta cultura ao menos alternando-a com a soja, em áreas de integração lavoura-pecuária.

Observando os incrementos dos estoques de COp, observa-se que a monocultura de soja nas áreas que não receberam pastoreios no inverno, apresentaram estoques inferiores de CO nesta fração do que nas áreas sob pastoreio a cada 28 dias. Embora não tenha sido determinada neste trabalho, a maior taxa de decomposição da leguminosa pode ter influenciado neste aspecto.

4.5. Nitrogênio Total no Solo

4.5.1. Fracionamento e teores de NT no perfil do Solo

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam as concentrações de N no solo nas diferentes frações granulométricas avaliadas: NT_p, NT_{am} e NT, respectivamente. Observa-se que, da mesma maneira que se verificou quanto aos teores de CO do solo, o acúmulo de N no solo deu-se principalmente nas camadas mais superiores em função da decomposição de resíduos vegetais das culturas que contém este elemento em seu tecido. Comparando os teores de N nas frações granulométricas avaliadas, observa-se que as maiores variações entre os tratamentos ocorreram na fração particulada da MOS, devido a maior sensibilidade desta fração ao manejo do solo e a insensibilidade da fração associada a minerais em curtos períodos de manejo. A pouca variação dos teores de NT no solo devem-se igualmente a grande participação da fração NT_{am} na composição dos estoques de NT.

Analisando mais detalhadamente a Figura 23, nota-se que os as áreas que não recebem pastoreios no inverno apresentaram maiores teores de NT_p. Tal fato pode ser atribuído a maior ciclagem de nitrogênio ocorrida nestes tratamentos, considerando que não houve exportação deste elemento pelo consumo das pastagens de inverno pelos animais além da maior fixação biológica de N nas áreas que receberam a cultura da soja neste tratamento. O tratamento P28 apresentou em todas as camadas teores de NT_p semelhantes aos do solo em sua condição original e o tratamento P14 apresentou redução dos teores de NT_p em relação aos demais tratamentos. Contribuíram para a menor concentração de N nas áreas sob o tratamento P14, a maior exportação de N pelo consumo de forragem no inverno, menor produção de fitomassa da soja e do milho e conseqüente menor fixação biológica de N e absorção de N, respectivamente.

Ainda pela mesma figura, nota-se maiores concentrações de NT_p nas áreas de Mon-M do que nas áreas de Mon-S. Isto deve-se a adubação nitrogenada aplicada nas áreas de milho, que permitiram um acúmulo de NT_p superior às áreas de soja. Desta maneira a adubação mineral compensou e aumentou a ciclagem de nitrogênio em comparação com as áreas que apenas tiveram como fonte de N a fixação biológica pela cultura da soja.

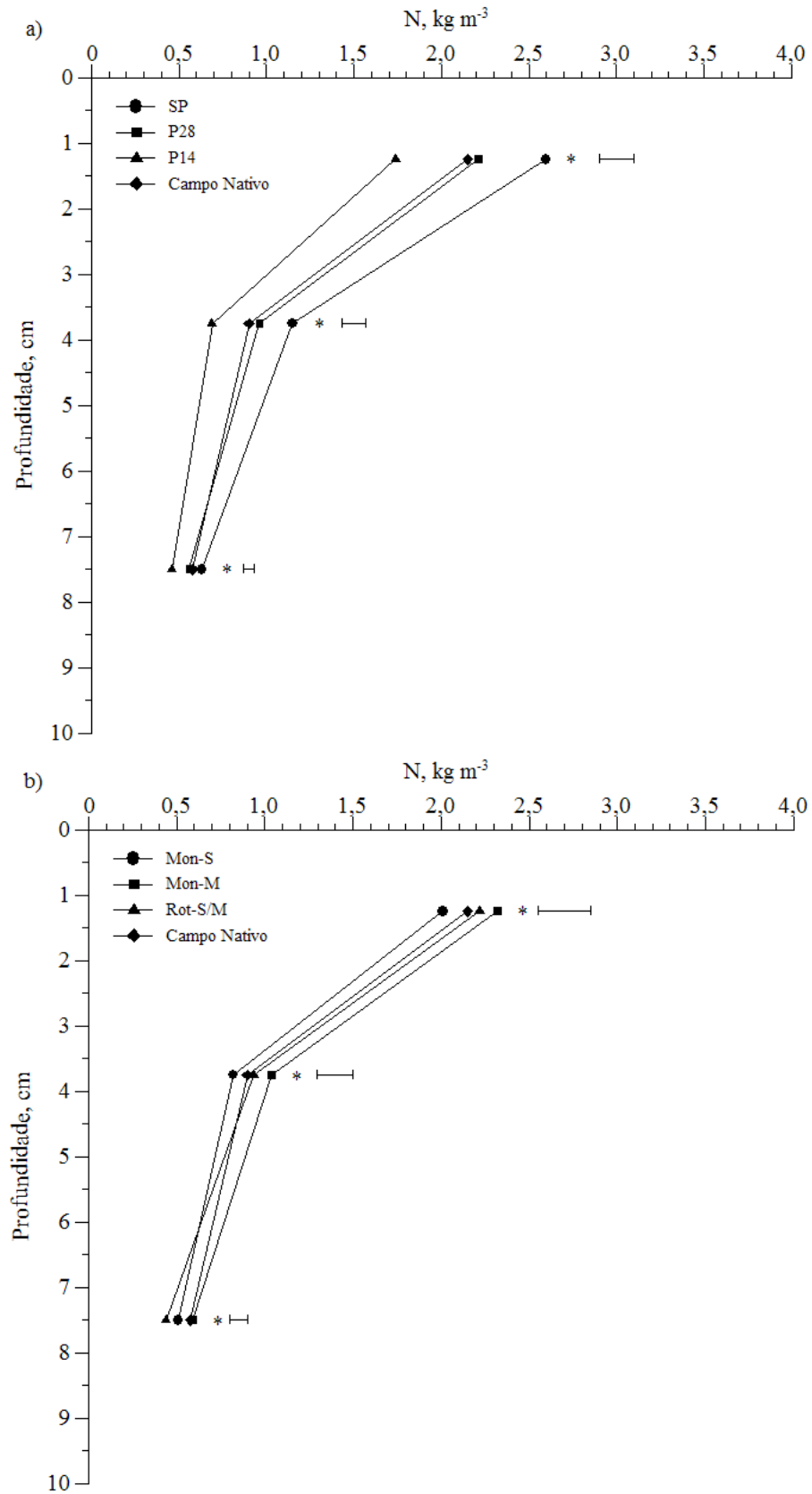


Figura 23. Teores de NTP (>53 μm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. *DMS pelo teste Tukey a 5%.

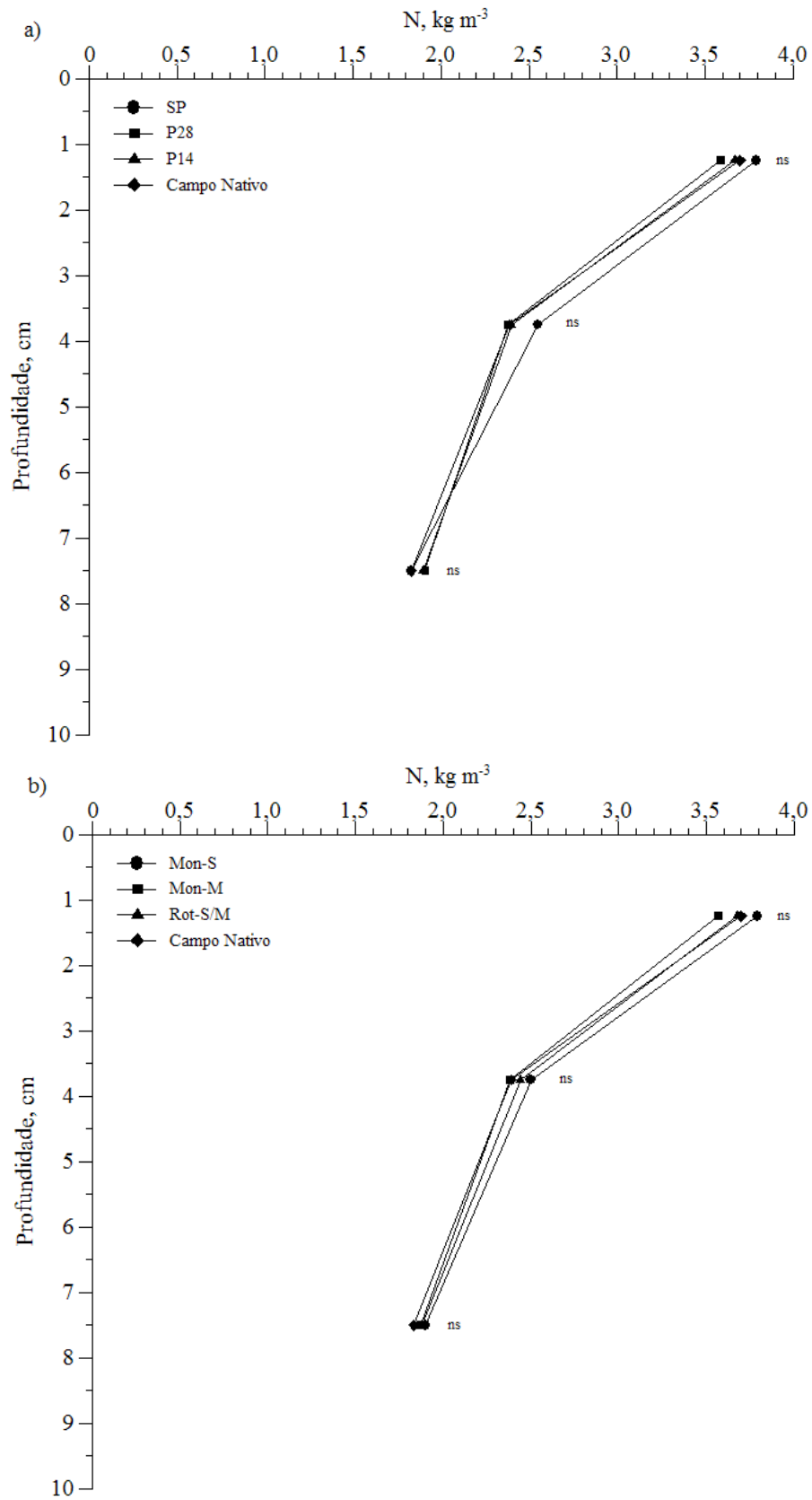


Figura 24. Teores de NTam (<math><53 \mu\text{m}</math>) de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. ^{ns} Teste F não significativo a 5%.

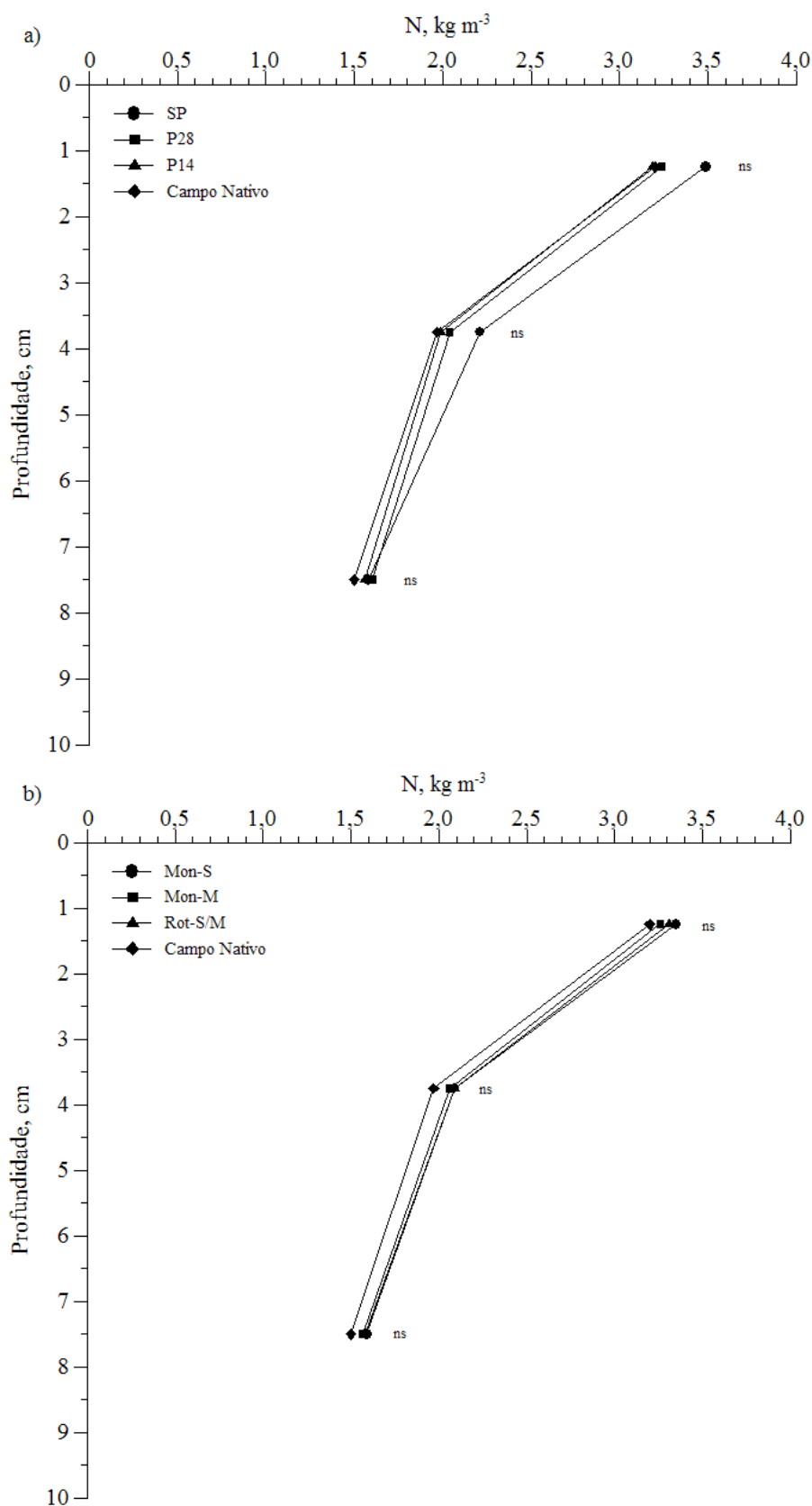


FIGURA 25. Teores de NT em um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno (a) e sistema de culturas de verão (b). ACR, Jari – RS, 2005. ^{ns} Teste F não significativo a 5%.

4.5.2. Estoques de NT e sensibilidade das frações granulométricas

A Tabela 11 apresenta os estoques de NT, NTp e NTam nas camadas 0 – 2,5, 2,5 – 5, 5 – 10 cm de profundidade em função da frequência de pastoreio empregada no inverno e sistema de culturas de verão.

TABELA 11. Estoques de NT, NTp e NTam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamentos		Ds	NTp	NTam	NT
		-- Mg m ⁻³ --	Profundidade 0 – 2,5 cm		
			----- kg ha ⁻¹ -----		
SP	Mon-S	0,87	123,3	648,9	772,2
	Mon-M	1,04	184,5	709,1	893,6
	Rot-S/M	1,06	182,2	731,7	913,9
P28	Mon-S	1,20	167,5	820,8	988,3
	Mon-M	1,17	164,0	766,6	930,6
	Rot-S/M	1,17	160,5	788,9	949,4
P14	Mon-S	1,20	113,5	845,1	958,6
	Mon-M	1,23	146,5	836,2	982,7
	Rot-S/M	1,29	141,4	892,8	1034,2
Campo Nativo		1,09	146,7	722,9	869,6
			Profundidade 2,5 – 5 cm		
SP	Mon-S	0,87	51,7	430,2	481,9
	Mon-M	1,04	82,4	487,5	569,9
	Rot-S/M	1,06	76,6	504,5	581,1
P28	Mon-S	1,20	68,6	543,3	611,9
	Mon-M	1,17	68,6	520,7	589,3
	Rot-S/M	1,17	64,8	538,7	603,5
P14	Mon-S	1,20	40,5	559,0	599,5
	Mon-M	1,23	60,8	554,7	615,5
	Rot-S/M	1,29	51,2	591,4	642,6
Campo Nativo		1,09	58,4	475,6	534,0
			Profundidade 5 – 10 cm		
SP	Mon-S	1,30	76,5	943,6	1020,1
	Mon-M	1,35	100,7	964,8	1065,5
	Rot-S/M	1,37	96,3	983,9	1080,2
P28	Mon-S	1,34	87,1	990,1	1077,2
	Mon-M	1,36	89,7	998,0	1087,7
	Rot-S/M	1,34	85,6	973,4	1059,0
P14	Mon-S	1,33	63,4	985,2	1048,6
	Mon-M	1,32	80,7	936,7	1017,4
	Rot-S/M	1,30	71,2	951,7	1022,9
Campo Nativo		1,34	88,2	914,7	1002,9

Devido ao aumento da densidade do solo provocado pelo pisoteio bovino e a fim de evitar uma interpretação errônea dos dados apresentados, os estoques de NT no solo, em suas diferentes frações foram ajustados em função da densidade do solo no campo nativo, visto que os dados de estoque de NT não representam as variações nas concentrações de NT verificadas no solo e constam na Tabela 7.

TABELA 12. Estoques ajustados de NT, NTp e NTam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreio e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamentos		NTp	NTam	NT
Profundidade 0 – 2,5 cm				
----- kg ha ⁻¹ -----				
SP	Mon-S	192,3	815,4	1007,7
	Mon-M	155,0	739,0	894,0
	Rot-S/M	187,7	753,9	941,6
P28	Mon-S	152,0	743,5	895,5
	Mon-M	151,7	710,4	862,1
	Rot-S/M	149,8	736,1	885,9
P14	Mon-S	129,2	763,0	892,2
	Mon-M	102,4	737,1	839,5
	Rot-S/M	119,3	752,9	872,2
Campo Nativo		146,1	722,9	869,6
Profundidade 2,5 – 5 cm				
SP	Mon-S	85,9	540,6	626,5
	Mon-M	65,0	508,1	573,1
	Rot-S/M	79,0	519,8	598,8
P28	Mon-S	63,6	492,1	555,7
	Mon-M	62,1	482,5	544,6
	Rot-S/M	60,4	502,7	563,1
P14	Mon-S	53,6	504,7	558,3
	Mon-M	36,6	489,0	525,6
	Rot-S/M	43,2	498,7	541,9
Campo Nativo		58,1	475,6	534,0
Profundidade 5 – 10 cm				
SP	Mon-S	99,7	966,8	1066,5
	Mon-M	78,4	955,5	1033,9
	Rot-S/M	94,0	960,9	1054,9
P28	Mon-S	88,2	989,3	1077,5
	Mon-M	87,1	981,8	1068,9
	Rot-S/M	85,5	972,0	1057,5
P14	Mon-S	81,5	990,4	1071,9
	Mon-M	63,8	946,6	1010,4
	Rot-S/M	72,9	974,3	1047,2
Campo Nativo		88,2	914,7	1002,9

A partir deste momento, os valores de estoque de NT em todas as suas frações serão apresentados ajustados em função da Ds no campo nativo, como constam na Tabela 12. Sendo assim, eliminando-se o efeito de adensamento do solo pelo pisoteio bovino sobre os estoques de NT nos seus distintos compartimentos, verifica-se que os estoques de NT não foram alterados significativamente pelos tratamentos aplicados, assim como a fração associada a minerais do NT. No entanto, os estoques de NTp foram sensíveis ao manejo aplicado sobre as pastagens de inverno e aos sistemas de culturas de verão. A Tabela 13 apresenta uma análise das frações granulométricas em função do manejo, indicando a sensibilidade de cada fração como indicativo de qualidade do manejo.

Tabela 13. Estoques de NTp e NTam de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico segundo o manejo das pastagens de inverno e o sistema de culturas de verão, ajustados pela densidade do solo no campo nativo. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamento	NTp			Ntam			NTp/NT
	kg ha ⁻¹	Δ %*	Δ kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Δ %	Δ kg ha ⁻¹	
Profundidade 0,0 – 2,5 cm							
SP	178 a*	21,92	32	769	6,36	36	0,19 a
P28	151 b	3,42	5	730	0,96	7	0,17 a
P14	117 c	-19,86	-29	751	3,87	27	0,13 b
F (pastoreios)	65,04**			0,85 ^{ns}			30,30**
Mon-S	157 a	7,53	11	774	7,05	51	0,18 a
Mon-M	136 b	-6,85	-10	729	0,83	6	0,15 b
Rot-S/M	152 ab	4,11	6	748	3,56	25	0,17 ab
F (culturas)	6,29**			0,96 ^{ns}			4,56**
F (interação)	1,92 ^{ns}			0,17 ^{ns}			0,93 ^{ns}
C. Nativo	146			723			0,17
CV (%)	25,15			22,94			24,42
Profundidade 2,5 – 5,0 cm							
SP	77 a	32,76	19	523	9,87	47	0,13 a
P28	62 b	6,89	4	492	3,36	16	0,11 a
P14	44 c	-24,14	-14	497	4,41	21	0,08 b
F (past.)	48,40**			0,77 ^{ns}			21,94**
Mon-S	68 a	17,24	10	512	7,56	36	0,12 a
Mon-M	54 b	-6,90	-4	493	3,57	17	0,10 b
Rot-S/M	61 ab	5,17	3	507	6,51	31	0,11 ab
F (cult.)	26,65**			0,67 ^{ns}			13,57**
F (inter.)	2,75 ^{ns}			0,15 ^{ns}			2,77 ^{ns}
C. Nativo	58			476			0,11
CV (%)	23,67			24,87			24,77

Tratamentos	NTp			NTam			NTp/NT
	kg ha ⁻¹	Δ %	Δ kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Δ %	Δ kg ha ⁻¹	
Profundidade 5,0 – 10,0 cm							
SP	91 a	3,41	3	961	5,03	46	0,09 a
P28	87 a	-1,14	-1	981	7,21	66	0,08 ab
P14	73 b	-17,05	-15	970	6,02	55	0,07 b
F (past.)	18,70**			0,15 ^{ns}			11,40**
Mon-S	90 a	2,27	2	982	7,32	67	0,09 a
Mon-M	76 b	-13,63	-12	961	5,03	46	0,07 b
Rot-S/M	84 a	-4,54	-4	969	5,90	54	0,08 ab
F (cult.)	4,37**			0,19 ^{ns}			3,64**
F (inter.)	1,08 ^{ns}			0,08 ^{ns}			0,66 ^{ns}
C. Nativo	88			915			0,09
CV (%)	22,39			23,23			23,75
Profundidade 0,0 – 10,0 cm							
SP	346 a	18,49	54	2253	6,52	139	0,13 a
P28	300 b	2,74	8	2203	4,21	89	0,12 a
P14	234 c	-19,86	-58	2219	4,96	105	0,09 b
F (past.)	74,72**			0,54 ^{ns}			64,65**
Mon-S	315 a	7,87	23	2269	7,33	155	0,12 a
Mon-M	267 c	-8,56	-25	2183	3,26	69	0,10 b
Rot-S/M	297 b	1,71	5	2224	5,20	110	0,12 b
F (cult.)	11,33**			1,17 ^{ns}			8,33**
F (inter.)	2,57 ^{ns}			0,10 ^{ns}			1,79 ^{ns}
C. Nativo	292			2114			0,12
CV (%)	21,24			20,88			19,41

* Δ foi calculada em relação aos estoques do campo nativo.

** Tukey a 5 %.

*** Teste F significativo a 5 %.

^{ns} Não significativo pelo teste F a 5 %.

Pela Tabela 13, pode-se observar que os estoques de NTp foram afetados pelo manejo empregado em todas as camadas avaliadas, em contrapartida aos estoques de NTam que foram insensíveis tanto em relação a frequência de pastoreio empregada como em função do sistema de culturas de verão adotado. Da mesma maneira que o observado quanto aos estoques de CO, observa-se que o manejo de pastoreios no inverno provocaram maiores alterações aos estoques de NTp do que o sistema de culturas de verão. Este resultado pode ser atribuído a maior restrição na ciclagem de nitrogênio devido ao pastoreio bovino pelo consumo das pastagens de inverno do que as diferenças de adições e ciclagens de nitrogênio pelas culturas de verão, visto que a fixação biológica de N pela soja foi compensada em parte pela adubação nitrogenada aplicada sobre a cultura do milho. As camadas de solo que mais acumularam ou perderam NTp em função do manejo aplicado em cada

tratamento foram as mais superficiais, da mesma maneira que foi observado ao avaliarmos o CO.

A frequência de pastoreios sobre as pastagens de inverno afetaram os estoques de NTp da mesma maneira que os estoques de COp, sendo que as áreas que não receberam animais no inverno apresentaram maiores estoques de NTp do que os demais tratamentos e do solo em sua condição original. As áreas que receberam pastoreios a cada 28 dias apresentaram comportamento intermediário aos demais tratamentos e valores bastante próximos aos do campo nativo, enquanto que as áreas que receberam a maior frequência de pastoreios (P14), apresentaram redução dos estoques de NTp em relação aos demais tratamentos e ao campo nativo.

Por outro lado, o sistema de culturas de verão proporcionou uma dinâmica do NTp diferente dos estoques de COp, visto que desta vez, o sistema de culturas que mais adicionou NT ao solo, foi a Mon-S. Isto deve-se a alta adição de N ao solo pela decomposição da palhada da soja, rica neste nutriente. As áreas que tiveram rotação de soja e milho apresentaram comportamento intermediário aos demais tratamentos e as áreas cultivadas sob a monocultura de milho foram as que apresentaram os menores estoques de NTp, devido a alta relação C/N da palhada de milho e das pastagens de inverno e baixa adição de N ao solo em relação aos sistemas de culturas que incluíam a soja.

As modificações nos estoques de NTp provocaram a alteração da proporção desta fração na composição dos estoques de NT. Desta maneira, as áreas que não receberam pastoreios no inverno aumentaram a relação NTp/NT, enquanto que as áreas com maior frequência de pastoreios reduziram a participação da fração particulada nos estoques de NT. Em relação aos sistemas de culturas de verão, as áreas que tiveram a soja num sistema de monocultura ou rotação com o milho, permitiram o aumento da relação NTp/NT em relação a proporção observada no campo nativo. Em contrapartida, as áreas que foram cultivadas com monocultura de milho apresentaram redução da razão NTp/NT observada no solo em sua condição original.

A Tabela 14 demonstra a relação C/N das diferentes frações granulométricas da MOS em cada camada de solo avaliada e em função da combinação das diferentes frequências de pastoreios aplicadas durante o inverno em áreas que receberam os sistemas de culturas de verão avaliados.

TABELA 14. Relação C/N das frações granulométricas de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da frequência de pastoreios no inverno e sistema de culturas de verão e do campo nativo. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamentos	> 53 μ m	< 53 μ m	Total
Profundidade 0 – 2,5 cm			
SP	15,2	11,5	12,3
P28	15,3	12,2	12,7
P14	15,6	12,0	12,5
Mon-S	13,0	11,6	11,8
Mon-M	17,9	12,2	13,1
Rot-S/M	15,2	11,9	12,5
Campo Nativo	15,3	12,2	12,8
Profundidade 2,5 – 5 cm			
SP	16,3	10,7	11,5
P28	16,1	11,4	12,0
P14	17,0	11,5	11,8
Mon-S	12,8	11,1	11,2
Mon-M	20,5	11,3	12,3
Rot-S/M	16,1	11,2	11,7
Campo Nativo	16,1	11,8	12,3
Profundidade 5 – 10 cm			
SP	17,2	12,0	12,5
P28	17,2	11,6	12,1
P14	17,7	11,7	12,1
Mon-S	14,4	11,7	11,9
Mon-M	20,5	11,8	12,5
Rot-S/M	17,1	11,8	12,3
Campo Nativo	15,8	12,5	12,7
Profundidade 0 – 10 cm			
SP	16,0	11,5	12,2
P28	16,0	11,8	12,3
P14	16,5	11,8	12,2
Mon-S	13,4	11,5	11,7
Mon-M	19,2	11,9	12,6
Rot-S/M	15,9	11,7	12,2
Campo Nativo	15,6	12,2	12,7

As maiores variações na relação C/N das frações granulométricas avaliadas ocorreram na fração particulada. Neste compartimento da MOS, a frequência de pastoreios aplicada durante o inverno não causou grande variação em sua relação C/N, visto que o equilíbrio entre as adições de C e N via resíduos vegetais não alterou-se pelo consumo de forragem pelos animais no inverno. Por outro lado, os

sistemas de culturas de verão provocaram alterações na relação C/N da fração particulada devido as diferenças entre a qualidade do material adicionado pela soja. A presença da soja, rica em nitrogênio provocou uma redução da relação C/N deste compartimento da MOS, enquanto que a monocultura de milho manteve a relação C/N desta fração em níveis mais elevados e as áreas de rotação soja/milho apresentaram comportamento intermediário aos demais. A menor relação C/N deste compartimento quando sob monocultura de soja, pode teoricamente contribuir para uma ciclagem deste mais rápida desta fração da MOS. Por outro lado, a maior relação C/N das áreas sob monocultura de milho refletem o grande acúmulo de C nesta fração se comparada ao resultados observados do solo em sua condição original.

Alterações menos significativas, mas também importantes foram observadas na relação C/N total da MOS. Os dados demonstram que houve pouca variação quanto a frequência de pastoreio empregada, embora nas camadas mais superficiais do solo, tenha observado-se que as áreas que não receberam pastoreios no inverno apresentaram relação C/N um pouco inferior as demais. No entanto, nota-se também nesta avaliação que o sistema de culturas de verão provocou alterações mais significativas na relação C/N da MOS. Observa-se que a medida que aumenta a participação da soja nos sistemas de culturas, ocorreu uma diminuição da relação C/N da MOS. Tais resultados concordam com os obtidos por Lovato (2001) que observou uma redução da relação C/N da MOS a medida que se aumentava a participação de leguminosas no sistemas de culturas avaliados pelo autor.

Segundo Diekow (2003), a maior relação C/N da fração particulada em relação as demais frações avaliadas reside no fato desta fração ter como principal fonte de C os resíduos vegetais, enquanto que os demais compartimentos avaliados tem como principal fonte de C produtos de origem microbiana, os quais apresentam relação C/N mais baixa, e apresentam um grau de humificação mais avançado do que a fração particulada da MOS.

A Figura 26 demonstra os estoques de cada fração do NT comparados aos observados no campo nativo na camada de 0 – 10 cm de solo, enquanto que a Figura 27, apresenta a comparação entre a sensibilidade das frações granulométricas do NT ao manejo aplicado sobre as pastagens de inverno e sistema de culturas de verão empregado, também na camada 0 – 10 cm.

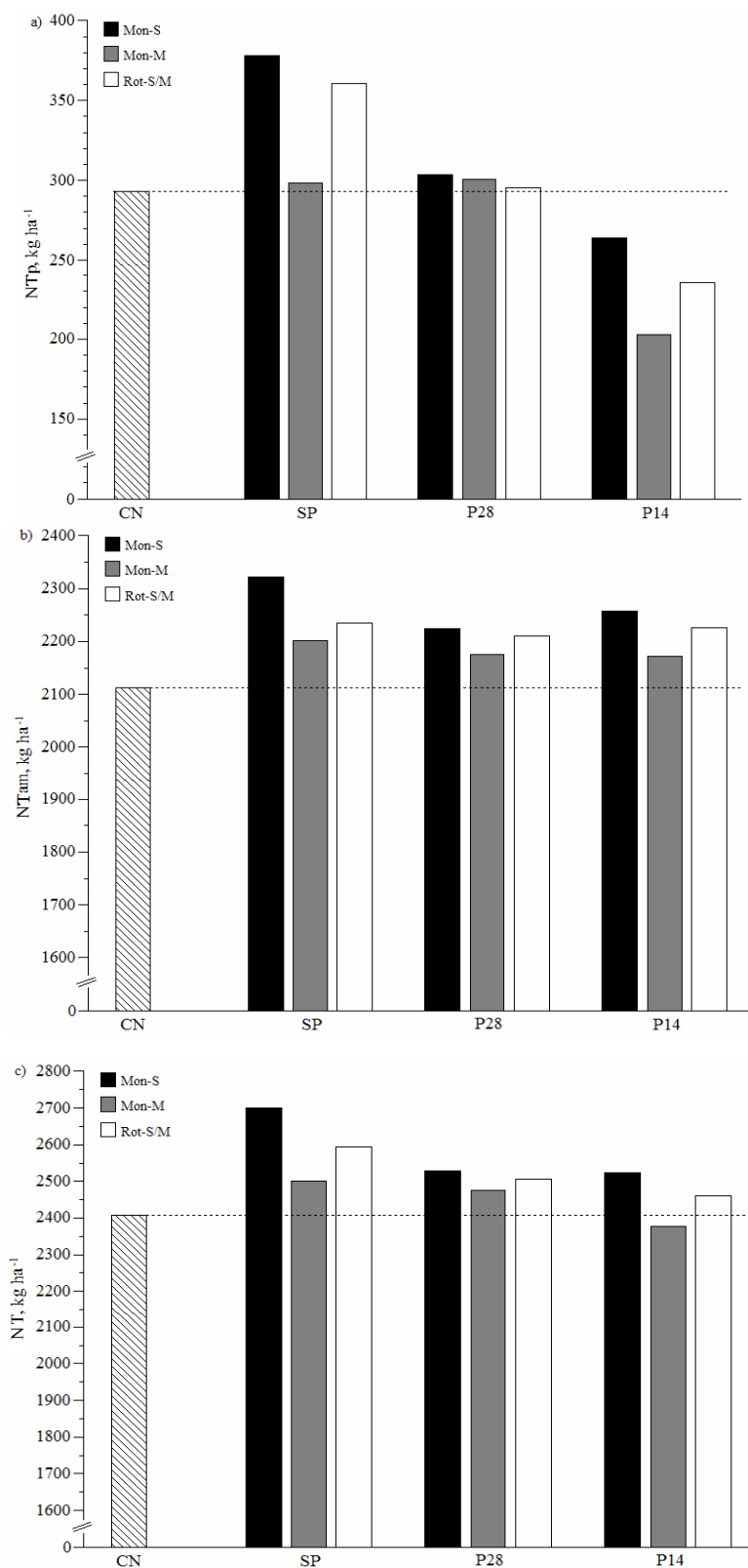


FIGURA 26. Estoques de NT nas frações particulada (a), associada a minerais (b) e total (c) na camada de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função da freqüência de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão empregado. ACR, Jari – RS, 2005.

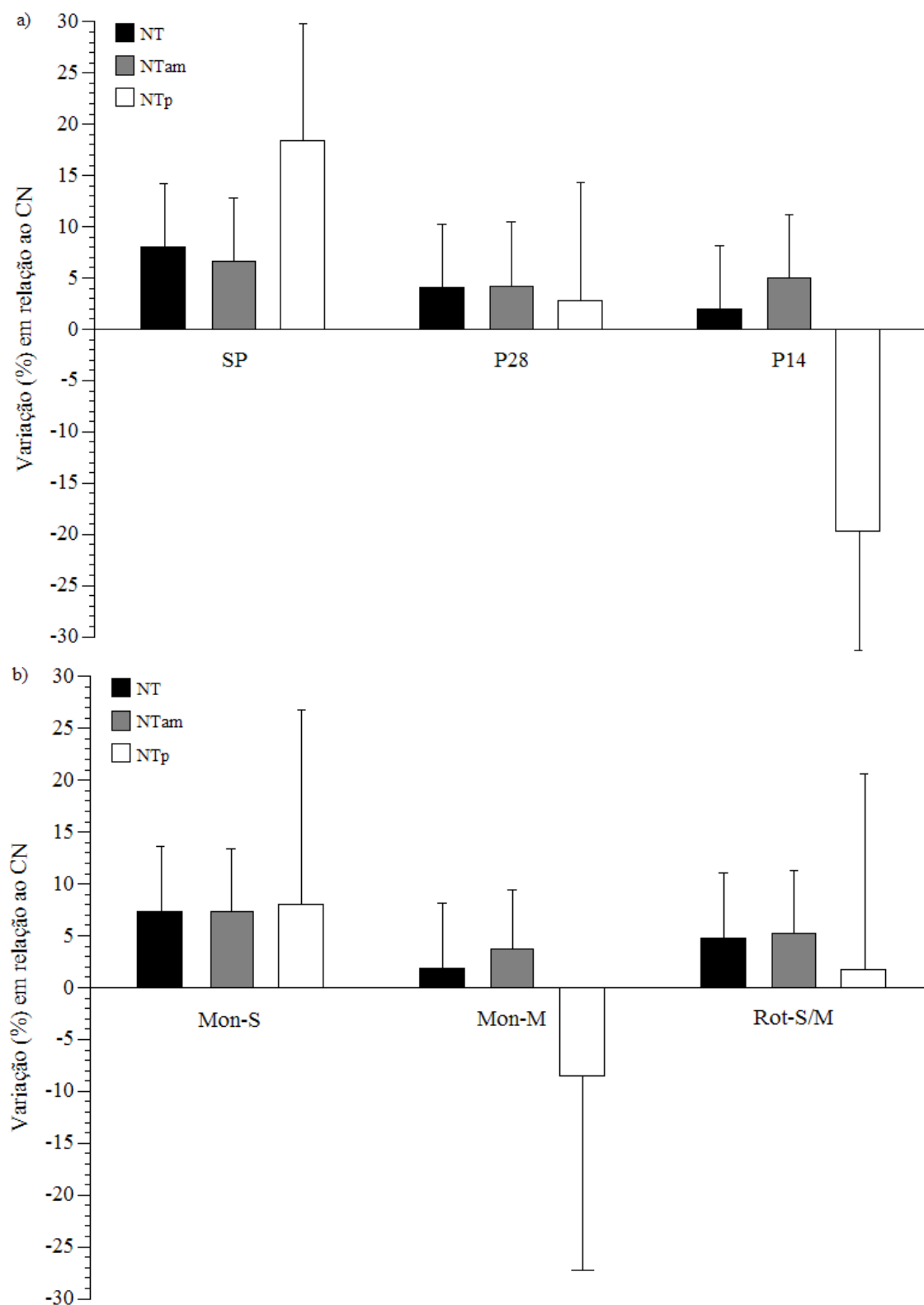


FIGURA 27. Variação percentual dos estoques de NT, NTam e NTP de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em relação ao campo nativo em função das freqüências de pastoreio (a) e sistemas de culturas empregado (b). ACR, Jari – RS, 2005.

A partir da Figura 26 e de um modo geral, pode-se afirmar que a conversão do campo nativo em áreas de integração lavoura-pecuária promoveram o incrementos nos estoques de NT do solo, com exceção do tratamentos P14 Mon-M, que teve uma pequena redução nos estoques de NT. Esta redução não chega a significar a possibilidade de deficiência no fornecimento de N para os vegetais em crescimentos, ao notarmos a alta concentração deste elemento no solo em todos os tratamentos. Na fração associada a minerais do NT, todos os tratamentos aplicados propiciaram a elevação nos estoques de NTam no solo. Isto se deve ao aumento da adição de N pelos resíduos vegetais das plantas que cresceram sobre o solo e da adubação nitrogenada sobre o milho, além da maior decomposição e conseqüente transferência do N que se encontrava junto a fração particulada para o compartimento mais estabilizado da MOS.

A fração particulada do NT foi mais sensível ao manejo aplicado, tendo reduzido os seus estoques de NTp quando se utilizou uma maior freqüência de pastoreio sobre as pastagens de inverno (P14). Uma possível razão disto foi a maior decomposição deste compartimento nestas áreas devido à manutenção da adição de resíduos vegetais com baixa relação C/N no verão (soja) ou da adubação nitrogenada aplicada sobre o milho e da menor adição de palhada ao solo pelas pastagens de inverno, o que reduziu o tempo de permanência do NT neste compartimento da MOS. Por outro lado, as áreas que não receberam pastoreios ou o receberam numa freqüência mais adequada (P28), demonstraram elevação nos estoques de NTp, contribuindo assim para a elevação dos estoques de NT no solo e manutenção da boa disponibilidade deste elemento as plantas.

Pela Figura 27, podemos comparar a sensibilidade de cada fração granulométrica do NT como indicativo do histórico de manejo de solo e aplicação dos tratamentos. Da mesma maneira que descrito para os estoques de CO, observa-se que o compartimento do NT mais sensível ao manejo foi o NTp, enquanto que o menos sensível foi o NTam, devido a sua maior estabilidade e proteção natural. Observa-se também que as freqüências de pastoreios aplicadas tiveram maior impacto aos estoques de NTp do que os sistemas de culturas de verão utilizados, o que reforça a idéia de que para aumentarmos os estoques de NT no solo é necessário que se aumente os estoque de CO em proporção semelhante, para que não ocorram perdas deste elemento através da decomposição dos compostos nitrogenados e subseqüente lixiviação, volatilização ou denitrificação do N do solo.

4.6. Fósforo e Potássio disponíveis

A disponibilidade de P e K no solo afetada pelas freqüências de pastoreios no inverno e sistemas de culturas de verão pode ser observada na Tabela 15.

TABELA 15. Disponibilidade de P e K na camada 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico em função das freqüências de pastoreios e sistemas de culturas de verão. ACR, Jari – RS, 2005.

Tratamento	P	K
	----- mg dm ⁻³ -----	
SP	11,4	191
P28	10,9	185
P14	10,4	171
F (Pastoreios)	0,53 ^{ns}	4,37 ^{ns}
Mon-S	10,0 b*	178
Mon-M	12,7 a	188
Rot-S/M	10,0 b	181
F (culturas)	5,21**	1,32 ^{ns}
F (interação)	2,03 ^{ns}	1,32 ^{ns}
Campo Nativo	2,7	155
CV (%)	21,61	14,83

* Tukey a 5 %. ** Teste F a 5 %. ^{ns} Não significativo pelo teste F a 5 %.

Pela Tabela 15, observa-se que a adubação fosfatada e potássica aplicada durante estes quatro anos de condução deste experimento foi eficiente em elevar a disponibilidade de ambos os nutrientes na camada 0 – 10 cm do solo em relação a condição original do solo sob campo nativo.

A menor disponibilidade de P nas áreas que incluíam a cultura da soja no sistema de culturas coincide com a maior exportação deste nutriente pela leguminosa do que pela cultura do milho. Tal tendência também foi percebida, embora não significativa estatisticamente, nos dados referentes ao K. Analisando os dados de P num primeiro momento, seria possível esperar que as áreas de Rot-S/M apresentassem um comportamento intermediário aos outros sistemas de culturas, porém os resultados observados são lógicos se considerarmos a maior produtividade de soja e de milho nestas áreas e a conseqüente maior exportação de P pela colheita dos grãos destas culturas.

Ao verificarmos um maior teor de P no solo nas áreas de monocultura de milho, também seria possível supor que o rendimento de grãos de milho nestas áreas fossem superiores aos rendimentos nas áreas de milho em rotação com a soja. No entanto, como a adubação de P e K é realizada na semeadura do milho, esta supre as necessidades destes nutrientes as plantas e possibilita um maior rendimento de grãos nas áreas de rotações, o qual também pode ser atribuído, no caso do milho a maior disponibilidade de N no solo pela presença da soja como cultura antecessora.

O mesmo raciocínio aplicado a produção de forragem e conseqüente ganho de peso animal durante o inverno parece ser verdadeiro, uma vez que estas aproveitam apenas o efeito residual do adubo aplicado no verão e são mais dependentes da disponibilidade dos nutrientes no solo. Isto explica, em partes, a maior produção de forragem nas áreas de monocultura de milho, que tiveram maior disponibilidade de P no solo, visto que as altas concentrações de N e K no solo não permitiriam a deficiência destes nutrientes as pastagens.

As freqüências de pastoreios aplicadas sobre as pastagens de inverno não afetaram significativamente a disponibilidade de P e K no solo, embora se tenha percebido uma leve tendência de diminuição da concentração destes nutrientes no solo quando se optou pelo aumento da intensidade de utilização das pastagens de inverno. Possivelmente, a tendência a uma menor disponibilidade de P e K pelo aumento da freqüência de pastoreios é devido a exportação destes elementos pelo consumo de forragem pelos animais. É importante notar que não foi considerado o retorno destes nutrientes pelas excreções dos animais, o que possivelmente reduziria as diferenças entre os tratamentos

A disponibilidade de K no solo pode ser classificado segundo a Comissão... (1995) como alta em todos os tratamentos. Quanto ao P, a classificação da disponibilidade deste elemento no solo, segundo a Comissão... (1995), é considerada alta nas áreas de monocultura de milho e média nas demais áreas.

4.7. Correlação dos parâmetros avaliados

As Tabelas 16 e 17 demonstram a correlação das produtividades das culturas com os parâmetros de solo avaliados segundo a combinação dos tratamentos aplicados (16) e em função das freqüências de pastoreios no inverno (17).

TABELA 16. Coeficientes de correlação entre os parâmetros de solo avaliados na camada 0 – 10 cm e rendimento das culturas de verão, considerando as freqüências de pastoreios aplicadas e sistemas de culturas de verão sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2005.

Atributos	COT	NT	COp	NTp	COam	NTam	IMC	P	K	Soja	Milho
COT	1,00	0,47*	0,83***	0,27*	Ns	ns	0,83***	ns	0,80***	0,85**	0,80**
NT		1,00	0,27*	0,74**	Ns	ns	0,27*	ns	ns	0,47*	0,84**
COp			1,00	ns	Ns	ns	0,99***	ns	0,75***	0,65*	0,66*
NTp				1,00	Ns	ns	ns	ns	ns	0,43*	0,87**
COam					1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NTam						1,00	ns	ns	ns	ns	ns
IMC							1,00	ns	0,76***	0,67*	0,65*
P								1,00	ns	ns	ns
K									1,00	0,75**	0,49*
Soja										1,00	0,85**
Milho											1,00

* Significativo a 5 %.

** Significativo a 1 %.

*** Significativo a 0,1 %.

^{ns} Não significativo a 5 %.

TABELA 17. Coeficientes de correlação entre os parâmetros de solo avaliados na camada 0 – 10 cm e rendimento das culturas de verão, considerando apenas a média dos tratamentos que compõem cada frequência de pastoreios aplicada sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico. ACR, Jari – RS, 2005.

Atributos	COT	NT	COp	NTp	COam	NTam	IMC	P	K	Soja	Milho
COT	1,00	0,91**	0,98**	0,99**	Ns	ns	0,98**	0,99***	0,93*	0,91*	0,99***
NT		1,00	0,81*	0,85*	Ns	ns	0,82*	0,92*	ns	0,99***	0,91*
COp			1,00	0,99***	Ns	ns	0,99***	0,98**	0,98**	0,80*	0,98**
NTp				1,00	Ns	ns	0,99***	0,99**	0,97**	0,85*	0,99***
COam					1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NTam						1,00	ns	ns	ns	ns	ns
IMC							1,00	0,98**	0,98**	0,82*	0,98**
P								1,00	0,92*	0,92*	0,99***
K									1,00	ns	0,93*
Soja										1,00	0,91*
Milho											1,00

* Significativo a 5 %.

** Significativo a 1 %.

*** Significativo a 0,1 %.

^{ns} Não significativo a 5 %.

Pela Tabela 16, pode-se observar que as correlações entre a maioria dos parâmetros avaliados embora significativas estatisticamente são relativamente baixas, devido a alta variação entre os tratamentos de adições de C e N via resíduos vegetais. Tomando por exemplo o tratamento P14 Mon-S, este apresenta uma menor adição de C devido a maior consumo de forragem pelo pastoreio bovino no inverno e alta adição de N pela presença da soja em monocultura no verão, estando em contraste com o tratamento SP Mon-M, que apresenta alta adição de C e uma adição de N proporcionalmente menor do que o tratamento anterior por apresentar apenas gramíneas no seu sistema de culturas. O ganho de peso animal no inverno ou a produção de palhada pelas culturas de inverno não foram incluídas nesta avaliação visto que se considerou que as diferenças observadas entre os tratamentos devem-se principalmente ao pastoreio bovino propriamente dito do que aos atributos de solo avaliados.

A fim de eliminar estas discrepâncias, a Tabela 17 apresenta a correlação dos mesmo parâmetros presentes na tabela 16, mas considerando as variações existentes apenas em função das frequências de pastoreios aplicadas sobre as pastagens de inverno. Assim, nota-se a maior correlação entre os parâmetros avaliados, inclusive com o rendimento das culturas de verão empregadas. Todos os parâmetros avaliados tiveram boa correlação com os demais, com exceção do COam e do NTam, devido a baixa sensibilidade desta fração ao manejo aplicado durante este curto período de avaliação (4 anos).

Por outro lado, os estoques de COT, NT, COp e NTp apresentaram alta correlação entre si, com os teores de P e K disponíveis no solo e com o rendimento de grãos das culturas de verão, o que indica a boa eficiência destes compartimentos da MOS em indicar a qualidade do manejo aplicado e sua alta correlação com os demais atributos de solo.

O milho apresentou maior correlação com os atributos de MOS avaliados do que a soja, o que indica que esta cultura é mais sensível as alterações na QS do que a leguminosa. Por outro lado, as variações nos teores de P disponíveis no solo tiveram maior correlação com o rendimento de grãos de soja e milho do que os teores de K disponíveis, visto que os valores deste nutriente estavam acima do nível crítico de suficiência em todos os tratamentos.

5. CONCLUSÕES

1. O aumento da frequência de pastoreios sobre as pastagens de inverno não beneficia o ganho de peso animal e promove a redução da produtividade das culturas de verão.

2. O aumento da frequência de pastoreios diminui o aporte de C ao solo o que resulta em redução dos estoques de CO do solo. Por outro lado, a inclusão do milho no sistema de culturas de verão permite maior adição de C ao solo e aumento dos seus estoques de CO.

3. A inclusão da soja no sistema de culturas de verão permitiu o aumento dos estoques de NT em relação aos sistemas de culturas baseados em monocultura de milho.

4. Os estoques de CO_p e NT_p são mais sensíveis do que os estoques de COT e NT ou CO_{am} e NT_{am} em curtos períodos de histórico de manejo.

5. A cultura da soja em monocultivo de verão somente deve ser utilizada em áreas com alta adição de palha no inverno, sob pena de redução dos estoques do COT, CO_p e CO_{am} do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 25:189-197, 2001.

BAPST, P.B.; ISLAM, K.R.; LEWIS, W.W.; MILLER, L.R.; LAL, R.; FAUSEY, N.R. **Soil carbon sequestration under different management practices**. Disponível em: <<http://southcenters.osu.edu/soil/cseq.htm>>. Acesso em 18 de Abril de 2004. 2005

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejos de solos**. Porto Alegre, 1996. 240f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo). Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

BAYER, C & MIELNICZUL, J. Conteúdo de nitrogênio total num solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 21: 235-239, 1997.

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-26.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C.N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 65:1473-1478, 2001a.

BAYER, C. ; MIELNICZUK, J. ; LOVATO, T. Potencial de sistemas de manejo para incrementar matéria orgânica na região Sul do Brasil. In: **I Simpósio sobre rotação soja/milho no plantio direto**. Piracicaba, POTAFOS, 2001b. CD-ROM.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P.R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on subtropical soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, 238:133-140, 2002.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de Carbono em frações lábeis na matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 39:677-683, 2004.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, 46:1459-1460, 1995.

BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GIROUX, M. & LAVERDIÈRE, M.R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**. 215:85-91, 1999.

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

BROWN, L.R. **Building a sustainable society**. New York: Norton. 1981.

BRUCE, J.P.; FROME, M.; HAITES, E.; JANZEN, H.; LAL, R.; PAUSTIAN K. Carbon sequestration in soils. **Journal of Soil and Water Conservation** 54:382-389. 1998.

CAMARGO, F.A.O.; SANTOS, G.A.; GUERRA, J.G.M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.27-40.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 56:777-783, 1992.

CASSOL, L.C. **Relações solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário em superfície**. Porto Alegre, 2003. 143f. Tese (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, 2003.

CERRI, C.C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo no agroecossistema cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1986. 197p. Tese (livre docência) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

CHAN, K.Y. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. **Soil Science Society of America Journal**. 61:1376-1382, 1997.

CHAN, K.Y.; HEENAN, D.P. & OATES, A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. **Soil & Tillage Research**. 63:133-139, 2002.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p.97-165.

COAMO/COODETEC. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas**. Campo Mourão / Cascavel. 1998.

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

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos correlacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2005. No Prelo.

DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, 24:281-292, 1986a.

DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland: III. Distribution and kinetics of soil organic carbon in particle-size fractions. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, 24:293-300, 1986b.

DEL LUCA, L.J.A.; GUARIENTI, E.M.; FONTANELI, R.S.; ZANOTTO, D.L. Influência de cortes simulando pastejo na composição química de grãos de cereais de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 34:1607-1614, 1999.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDRAS, N. & KÖPKE, U. **Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. GTZ / IAPAR. 1991. 272p.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. Porto Alegre, 2003. 164f. Tese (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, 2003.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-22. (Publication Number 35) .

DORAN, J.W. & ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, 15:3-11, 2000.

DUXBURY, J.M.; SMITH, M.S.; DORAN, J.W. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D.C. et al. (Eds.) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: Niftal Project, 1989. p.33-67.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 2000/01**. Embrapa Soja. Londrina: Embrapa Soja / Fundação MT, 2000.

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

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Área de Plantio Direto no Brasil**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em 18 de Abril de 2004. 2004.

FELLER, C. & BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**. 79:69-116, 1997.

FLORES, J.P.C. **Atributos de solo e rendimento de soja em um sistema de integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo em plantio direto com aplicação de calcário na superfície**. Porto Alegre, 2004. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

FONTANELI, R.S. & FREIRE JUNIOR, N. Avaliação de consorciações de aveia e azevém-anual com leguminosas de estação fria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 26:623-630, 1991.

FONTANELI, R.S. & PIOVEZAN, A.J. Efeito de cortes no rendimento de forragem e grãos de aveia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 26:691-697, 1991.

FONTANELI, R.S.; FONTANELI, R.S.; SILVA, G.; KOEHLER, D. Avaliação de cereais de inverno para duplo propósito. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 31:43-50, 1996.

FONTANELI, R.S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H.P.; IGNACZAK, J.C.; ZOLDAN, S.M. Análise econômica de sistema de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 35:2129-2137, 2000a.

FONTANELI, R.S. et al. **Sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, sob plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 84p. (Embrapa Trigo. Circular Técnica, 6). 2000b.

FRANZLUEBBERS, A.J.; STUEDEMANN, J.A.; SCHOMBERG, H.H.; WILKINSON, S.R. Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA. **Soil Biology & Biochemistry**. 32:469-478, 2000.

FUNDAÇÃO MT. **Boletim de pesquisa da soja**. n.6. 2002. 238p.

GARDNER, F.P. & WIGGANS, S.C. Effect of clipping and nitrogen fertilization on forrage and grain yields of spring oats. **Agronomy Journal**. 52:566-568. 1960.

GIACOMINI, S.J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E.R.O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R.S.; FRIES, M.R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 27:325-334, 2003.

GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soil by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, 32:285-309, 1994.

GOLCHIN, A.; BALDOCK, J.A.; OADES, J.M. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.245-266.

GOMES, J.F. & REIS, J.C.L. Produção de forrageiras anuais de estação fria no litoral sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Zootecnia**. 28:668-674, 1999.

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M. & ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, 74:367-385, 1994.

GREGORICH, E.G.; ELLERT, B.H. & MONREAL, C.M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ¹³C abundance. **Canadian Journal of Soil Science**, 75:161-167, 1995.

GREGORICH, E.G.; JANZEN, H.H. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.). Structure and organic matter storage in agricultural soils. **Advances in Soil Science**. Boca Raton: CRC Lewis, 1995. p.167-190.

HENIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, Paris, 15:17-29, 1945.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 1995 – 1996**. Brasília. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 18 de Abril de 2004. 1996.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Dezembro de 2004. Brasília. 127p. 2004.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: Synthesis Report**. Summary for Policymakers. IPCC Plenary XVIII. Wembley, UK. 34p. 2001.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, 55:69-78, 2000.

JASTROW, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, 28:665-676, 1996.

JASTROW, J.D. & MILLER, R.M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organo-mineral associations. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.207-223.

KERN, J.S. & JOHNSON, M.G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. **Soil Science Society of America Journal**. 57:200–210. 1993.

KOCHHANN, R.A. & DENARDIN, J.E. **Implantação e Manejo do Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36p. (Embrapa Trigo, Documentos, 20). 2000.

LANZANOVA, M.E. **Atributos físicos do solo em sistemas de culturas sob plantio direto na integração lavoura-pecuária**. Santa Maria, 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

LAL, R. Management of clay soils for erosion control. **Tropical Agriculture**. 59:133-138. 1982.

LAL, R. & PIERCE, F.J. The vanishing resource. In: LAL, R. & PIERCE, F.J. (Eds.) **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society. p.1-15. 1991.

LESAMA, M.F. **Produção animal em gramíneas de estação fria com fertilização nitrogenada ou associadas com leguminosa, com ou sem fertilização**

nitrogenada. Santa Maria, 1997. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 1997.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. Porto Alegre, 2001. 232f. Tese (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, 2001.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 28:175-187, 2004.

LUPATINI, G.C.; RESTLE, J.; CERETTA, M.; MOOJEN, E.L.; BARTZ, H.R. Avaliação da mistura de aveia preta e azevém sob pastejo submetida a níveis de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 33:939-1943, 1998a.

LUPATINI, G.C. Manejo, adubação e utilização de pastagens de estação fria na recria e terminação de bovinos de corte. In: RESTLE et al. **Produção intensiva com qualidade de bovinos de corte**. Santa Maria: UFSM, CCR, Departamento de Zootecnia, 1998b.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Balança Comercial do Agronegócio**. Dezembro de 2004. Secretaria de Produção e Comercialização. Brasília. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 18 de Abril de 2005. 2004a.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Rebanho Bovino Brasileiro**. Efetivo por Estado. Departamento de Estatísticas. Brasília. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em 18 de Abril de 2005. 2004b.

MIELNICZUK, J. Desenvolvimento de sistemas de culturas adaptadas à produtividade, conservação e recuperação de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., 1988. **A responsabilidade Social da Ciência do Solo**. Campinas : SBCS, 1988. p.109-116.

MIELNICZUK, J. Matéria Orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.1-8.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo do solo e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: **Tópicos em Ciência do Solo**. v.3, 2000. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

MORAES, A. et al. Lavoura-pecuária em sistemas integrados na pequena propriedade. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE, 3., 1998, Pato Branco. **Anais**. Pato Branco: CEFET-PR, 1998. CD-ROM.

MOSER, B.D. **An agricultural call to arms: addressing society's concerns**. Ecological paradigm. Disponível em: <<http://cfaes.osu.edu>>. Acesso em 18 de Abril de 2004. 2005.

MRABET, R.; SABER, N.; EL-BRAHLI, A.; LAHLOU, S.; BESSAM, F.; Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. **Soil & Tillage Research**. 57:225-235, 2001.

NAYAK, C.D., VARADACHARI, C., GHOSH, K. Studies on microbial decomposition of humic substances as affected by clay-humus complexation. **Journal of Indian Soil Science Society**, 38:738-741, 1990.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A. & LOEPPERT, R.H. (Eds.) **Methods of soil analysis: chemical methods**. Part 3. Madison, American Society of America, 1996. p.961-1010.

PADOVAN, M.R.; ALMEIDA, D.L.; GUERRA, J.G.M.; RIBEIRO, R.L.D.; NDIAYE, A. Avaliação de cultivares de soja, sob manejo orgânico, para fins de adubação verde e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, 37:1705-1710, 2002.

PAULETTI, V. **Nutrientes: teores e interpretações**. Campinas. Fundação ABC / Fundação Cargill. 1998.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J. & PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America journal**. 56:476-488, 1992.

PILLON, C.N. **Alteração no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de culturas em plantio direto**. Porto Alegre, 2000. 232 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PRESTON, C. M. Applications of NMR to soil organic matter analysis: history and prospects. **Soil Science**. 161:144-166, 1996.

PRIMAVESI, A.C.; PRIMAVESI, O.; CHINELLATO, A.; GODOY, R. Indicadores de determinação de cortes de cultivares de aveia forrageira. **Scientia Agricola**, 58:79-89, 2001.

RESTLE, J., LUPATINI, G.C., VALENTE, A.V. et al. Avaliação da mistura de aveia preta (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium multiflorum*) sob pastejo submetida a níveis

de nitrogênio. I- Produção animal. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 30, 1993, Rio de Janeiro. **Anais**. Viçosa: SBZ, 1993.

RESTLE, J.; LUPATINI, G.C.; ROSO, C.; SOARES, A.B. Eficiência e desempenho de categoriais de bovinos de corte em pastagem cultivada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 27:397-404, 1998a.

ROVIRA, J. **Manejo nutritivo de los rodeos de cría en pastoreo**. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. 1996. 288p.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal**. 65:1486-1499, 2001.

SANCHEZ, P.A. Soil organic matter. In: SANCHEZ, P.A. (Ed.) **Properties and management of soils in the tropics**. New York: John Wiley, 1976. p. 162-183.

SANTOS, H.P.; TOMM, G.O.; AMBROSI, I.; IGNACZAK, J.C.; WOBETO, C.; SATTLER, R. **Sistemas de rotação de culturas para trigo, sob plantio direto, durante dez anos, em Guarapuava, PR**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1998. 80p. (EMBRAPA-CNPT. Circular Técnica, 11)

SANTOS, H.P. & REIS, E.M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo. 2001. 212p.

SARRANTONIO, M.; DORAN, J.W.; LIEBIG, M.A. & HALVORSON, J.J. On-farm assessment of soil quality and health. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America Special Publication Number 49, 1996. p.83-105.

SLC AGRÍCOLA. **Experiências da SLC Agrícola no manejo da fertilidade do solo no cerrado**. (Informações Agronômicas, n.94). 2001

SIX, J.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, J.W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, 62:1367-1377, 1998.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdam, 74:65-105, 1996.

STOUT, J. D.; GOH, K. M.; RAFTER, T. A. Chemistry and turnover of naturally occurring resistant organic compounds in soil. IN: PAUL, E. A. & LADD, J. N. (Ed.) **Soil biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1985, p.1-73.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ª ed. rev. Porto Alegre: Departamento de Solos – UFRGS, 1995. 174p.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, Hagerstown, v.33, p.141-163, 1982.

VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. Porto Alegre, 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.

VOISIN, A. **A produtividade do pasto**. São Paulo. Mestre Jou. 1974

WOODRUFF, C.M. Estimating the nitrogen delivery of soil from the organic matter determination as reflected by sanborn field. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, 14:208-212, 1949.

ZECH, Z., SENESI, N., GUGGENBERGER, G., KAISER, K., LEHMANN, J., MIANO, T.M., MILTNER, A., SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, 79:69-116, 1997.

7. ANEXOS

ANEXO A. Vista da área experimental. Inverno de 2004.



ANEXO B. Aspecto da vegetação na área que não recebeu pastoreios durante inverno. Setembro de 2004.



ANEXO C. Disponibilidade de forragem na área que recebeu pastoreios a cada 28 dias. Setembro de 2004.



ANEXO D. Disponibilidade de forragem na área que recebeu pastoreios a cada 14 dias. Setembro de 2004.



ANEXO E. Realização dos pastoreios. Inverno de 2004.



ANEXO F. Detalhe dos animais pastejando. Agosto de 2004.



ANEXO G. Aspecto das culturas de verão. Janeiro de 2003.



ANEXO H. Rendimento de grãos de soja e milho nos anos anteriores de condução do experimento.

Tratamentos		2002	2003	2004	Média
		----- Mg ha ⁻¹ -----			
SP	Mon-S	3,52	2,28	3,92	3,24
	Mon-M	8,02	8,27	8,50	8,26
	Rot-S	3,52	2,44	4,40	3,45
	Rot-M	8,02	8,40	9,36	8,59
P28	Mon-S	3,52	2,17	3,53	3,07
	Mon-M	8,02	7,20	7,67	7,63
	Rot-S	3,52	2,30	3,76	3,19
	Rot-M	8,02	8,36	7,86	8,08
P14	Mon-S	3,52	2,17	3,29	2,99
	Mon-M	8,02	7,20	6,33	7,18
	Rot-S	3,52	2,30	3,45	3,09
	Rot-M	8,02	8,36	6,52	7,63

ANEXO I. Ganho de Peso Vivo nos anos anteriores de condução do experimento.

Tratamentos		2002	2003	2004	Média
		----- kg ha ⁻¹ -----			
P28	Mon-S	147,2	138,2	265,3	183,57
	Mon-M	119,3	134,4	371,7	208,47
	Rot-S	147,2	124,5	276,5	182,73
	Rot-M	119,3	126,8	321,5	189,20
P14	Mon-S	127,8	113,4	340,9	194,03
	Mon-M	101,3	116,7	425,1	214,37
	Rot-S	127,8	110,4	302,3	180,17
	Rot-M	101,3	107,2	310,7	173,07

ANEXO J. Matéria Seca final das pastagens de inverno nos anos anteriores de condução do experimento.

Tratamentos		2002	2003	2004	Média
		----- Mg ha ⁻¹ -----			
SP	Mon-S	6,50	9,28	10,37	8,72
	Mon-M	4,61	8,57	10,91	8,03
	Rot-S	6,50	8,14	9,33	7,99
	Rot-M	4,61	8,34	8,93	7,29
P28	Mon-S	4,39	5,19	2,80	4,13
	Mon-M	2,86	4,89	4,05	3,93
	Rot-S	4,39	4,76	3,04	4,06
	Rot-M	2,86	4,64	3,30	3,60
P14	Mon-S	4,39	3,57	2,31	3,42
	Mon-M	2,86	3,39	2,98	3,08
	Rot-S	4,39	3,47	2,25	3,37
	Rot-M	2,86	3,21	2,39	2,82