

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

**ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM LATOSSOLOS  
DO CERRADO SOB SISTEMAS DE USO E MANEJO**

**Michely Tomazi**  
**(Tese de doutorado)**

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

**ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM LATOSSOLOS  
DO CERRADO SOB SISTEMAS DE USO E MANEJO**

MICHELY TOMAZI

Engenheira Agrônoma (UFMT)

M. Sc. em Agricultura Tropical (UFMT)

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

Porto Alegre (RS), Brasil

Outubro de 2008

**CIP – CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO  
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS**

T655e Tomazi, Michely  
Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado sob sistemas de uso manejo / Michely Tomazi - Porto Alegre : M. Tomazi, 2008.

viii, 106f.; il

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

1. Manejo do solo : Uso do solo : Latossolo : Região do Cerrado : Matéria orgânica. I. Título.

CDD: 631.4

MICHELY TOMAZI  
Engenheira Agrônoma - UFMT  
Mestre em Agricultura Tropical - UFMT

## TESE

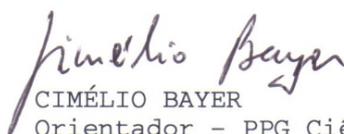
Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### **DOUTORA EM CIÊNCIA DO SOLO**

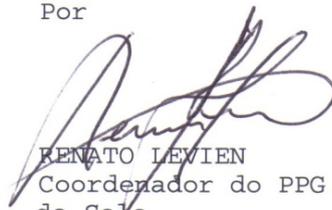
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 25/10/2008  
Pela Banca Examinadora

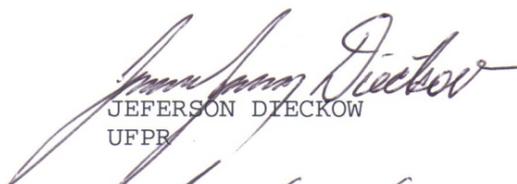
Homologado em: 31/10/2008  
Por



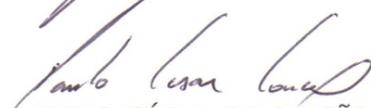
CIMÉLIO BAYER  
Orientador - PPG Ciência do Solo



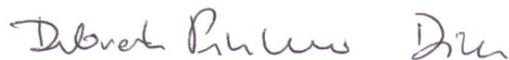
RENATO LEVIEN  
Coordenador do PPG Ciência  
do Solo



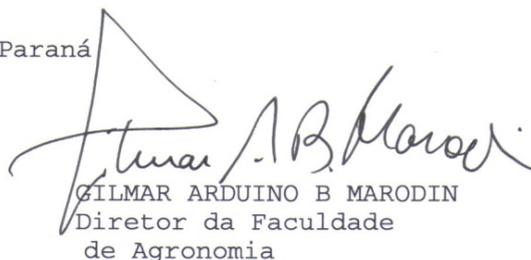
JEFERSON DIECKOW  
UFRP



PAULO CÉSAR CONCEIÇÃO  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná



DEBORAH PINHEIRO DICK  
Departamento de Físico-Química/UFRGS



GILMAR ARDUINO B MARODIN  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, e a oportunidade de vivenciar esta experiência.

A CAPES pelo apoio financeiro indispensável para a realização do curso de doutorado e a oportunidade de intercâmbio sanduíche na Alemanha.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por oferecer um ensino público gratuito e de qualidade, e em especial ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização deste trabalho.

A empresa SLC agrícola e sua equipe pela condução e disponibilização dos experimentos para pesquisa, e todo apoio logístico para coletas.

Ao professor Cimélio Bayer pela valiosa orientação, com dedicação, apoio e incentivo, dando-nos inspiração a cada dia pelo seu exemplo.

Ao professor João Mielniczuck por compartilhar seus conhecimentos com serenidade e humildade, mostrando-nos que é possível fazer cada dia melhor.

À professora Deborah Dick, obrigada pelo companherismo, força e constante incentivo, nos inspira com seu fazer e nos faz acreditar que somos capazes.

Aos professores Inda Júnior e Jeferson Dieckow pela amizade e constantes esclarecimentos de dúvidas.

Aos demais professores, não só da Pós-graduação, mas desde alfabetização, que compartilhando seus conhecimentos me deram a oportunidade de conhecer novos horizontes.

Na minha vida acadêmica gostaria de agradecer em especial o professor Eduardo Guimarães Couto e Fernando Scaramuzza que foram os primeiros a me mostrar a arte de trabalhar com solos.

Ao pesquisador Renato Roscoe com o qual dei meus primeiros passos na área de matéria orgânica, e pelo incentivo fazendo acreditar que eu era capaz.

À professora Heike Knicker pela recepção, compreensão e apoio durante todo tempo do doutorado sanduíche, e aos funcionários e estudantes que compartilharam os dias longe de casa comigo, em especial ao Alex, Pascale, Sabine e Gertie e ao Gabriel.

Aos ex-colegas de orientação, Frederico, Madalena, Júlio Salton, e Nilvânia pela parceria e apoio principalmente no início do curso, e em especial ao Paulo Cesar pelas inúmeras experiências transmitidas no laboratório e ricas discussões.

Aos amigos, colegas de curso e do grupo de manejo do solo, em especial à Analú, Aurélio Pavinato, Carlos Leguizamón, Cecília, Elisandra, Fabíola, Luis de França, Jeane, Josi, Mirla, Mariana, Natália, Regilene, Rosane, obrigada pelo agradável convívio, pelos momentos de trabalho, estudo e diversão.

Ao Fernando, Tiago e Rafael, acadêmicos de Agronomia pela amizade, diversão e auxílio nas atividades de laboratório.

Aos funcionários do Departamento de Solos da UFRGS, Luis Antônio (Tonho), Adão, José da Silva (Tio Zé) e Jader Amaro, pela presteza em nos auxiliar em todos os momentos;

A minha família que não mediu esforços para que eu pudesse chegar aqui hoje. Minha mãe Izaura que me alfabetizou, pelo seu companherismo junto ao meu pai Achilles, um exemplo de vida, sem medir esforços para nos dar oportunidades de crescer. Aos meus irmãos Simone e Márcio pelos bons momentos que disfrutamos juntos em nossa casa.

Ao Ricardo pelo companherismo e incentivo nos momentos difíceis. Obrigada pelos momentos compartilhados juntos.

E aos tantos outros que contribuíram para a esse sonho se tornar realidade, quero expressar o meu sincero agradecimento.

# ESTABILIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM LATOSSOLOS DO CERRADO SOB SISTEMAS DE USO E MANEJO<sup>1/</sup>

Autora: Michely Tomazi  
Orientador: Prof. Cimélio Bayer

## RESUMO

A pesquisa foi realizada em experimentos de longa-duração em Latossolos da região do Cerrado, e consistiu em três estudos. No estudo I a influência da granulometria da amostra (9,51 mm x 2,00 mm) na obtenção da fração leve oclusa (FLO) da matéria orgânica do solo (MOS) pelo fracionamento físico densimétrico foi avaliada sob sistemas de manejo contrastantes em agregação e em aporte de MOS ao solo. No estudo II o efeito dos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sobre os estoques de C do solo inteiro (COT) e das frações físicas da MOS (FL, fração leve e FP, fração pesada) foi avaliado, e os resultados utilizados no cálculo do índice de manejo de C em três Latossolos com textura e mineralogia distintas de Mato Grosso do Sul (MS), Goiás (GO), e Maranhão (MA) (LV-MS, LVA-GO e LVA-MA), sendo os dois primeiros de textura muito argilosa e o terceiro textura média. No estudo III avaliou-se o efeito dos sistemas de manejo PC, CM (cultivo mínimo) e PD, sobre a agregação do solo e os estoques de C e N do solo e das frações físicas da MOS (FLL-fração leve livre, FLO, e FP) dos solos LVA-GO e LV-MS, conduzidos há 15 e 13 anos, respectivamente. Verificou-se uma subestimação da quantidade de FLO quando utilizadas amostras < 2,00 mm, sendo esta mais acentuada nos solos e sistemas de manejo com maior índice de agregação e maior COT. O sistema PC promoveu reduções significativas do C do solo inteiro e das FL e FP sob PC no LVA-MA e LV-MS, reduzindo principalmente a labilidade do C. Entretanto, a conversão para PD acumulou C nos três solos em relação ao PC, na mesma taxa anual. No LV-MS a FP teve a maior contribuição para o aumento do C do solo (60%), enquanto que nos LVA-GO e LVA-MA a FL foi mais importante (70 e 78%). Desta forma, o PD proporcionou melhor qualidade do solo comparado ao PC evidenciado pelo aumento do IMC, principalmente no LVA-GO. Nos dois solos argilosos, a conversão de CE para agricultura em PC levou a uma redução acentuada da agregação, e conseqüentemente a FLO foi mais afetada. Entretanto, a recuperação parcial da agregação com adoção do PD e CM foi observada apenas no LV. Dentre as frações da MOS, a FLO foi a mais afetada com uso do PC e contribuiu para maiores perdas de C no LVA-GO, enquanto que na recuperação dos estoques de C em PD, a FLL foi a mais importante. Por outro lado, no LV-MS a FP foi a que mais contribuiu tanto para perdas como para os ganhos em C do solo. Os estoques de N seguiram a mesma tendência do C, porém com maiores concentrações na FP. A relação C:N demonstrou que as alterações nas frações ocorreram na ordem decrescente FLL>FLO>FP. A resistência dos solos aos impactos dos sistemas de manejo foi mais relacionada à mineralogia dos solos do que a textura.

<sup>1/</sup>Tese de Doutorado em Ciência do solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (106p) Outubro, 2008.

# STABILITY OF ORGANIC MATTER IN OXISOLS OF THE CERRADO UNDER SYSTEM OF USE AND MANAGEMENT<sup>1/</sup>

Author: Michely Tomazi

Adviser: Prof. Cimélio Bayer

## ABSTRACT

The research was based on long-term experiment in Oxisols in Cerrado region, constituting three studies. The study I verified the influence of the sample granulometric size (< 9,51 mm x < 2,00 mm) on C recovery in occluded light fraction (OLF) of the soil organic matter (SOM) by density physical fractionation in soils under management system contrasting in aggregation and SOM addition. In the study II the effect of conventional tillage (CT) and no tillage (NT) was evaluate on the C organic stocks in whole soil (TOC) and SOM physical fractions (ligh fraction- LF and density fraction - DF), and the results are used to calculate the carbon management index (CMI) in three Oxisols with distint texture and mineralogy in Mato Grosso do Sul (MS), Goiás (GO), and Maranhão (MA) states, the two first is clayed and the last is loam texture. Last study we investigate the effect of CT, MT (minimal tillage) and NT on soil aggreation and stocks of C and N in whole and in physical fractions of SOM (FLF-free ligh fraction, OLF, and HF) from GO and MS soils, cultivated 15 and 13 years, respective. We verified OLF subestimation when fractionation was initiate from < 2,00 mm soil sample, and it was more instense in management soil system with higher aggregation index and TOC. The CT promoted a significant C reduction on TOC, LF and HF in MA and MS, mainly in C lability. However, the CT conversion to NT increased the TOC input in the same annual rate on the three soils. In MS the HF contributed more to TOC increase (60%) while in GO and MA the LF was more important (70 e 78%). Then, the NT promoted better soil quality compare with CT express by higher IMC, mainly in GO. In clayed soils, the CT promoted elevave reduction on aggregation and consequently the OLF was more affected, however, the aggregation recovery on NT was evident only in MS. The OLF contribute more to C decrease in GO, but in C recuperation on NT, the LFL was more important. On the other hand, in MS the HF contribute more to C reduction on CT as well as input of C on NT. The N stocks follow same tendencies of the C, but with higher concentration in HF. The C:N rate demonstrate that fractions alteration was in order FLL>FLO>FP. The soil resistance to management impacts was more related to mineralogy than texture.

---

<sup>1/</sup>Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (106p) October, 2008.

## SUMÁRIO

Página

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Caracterização da região do Cerrado e do uso do solo .....	3
2.2 Matéria orgânica e a qualidade do sistema solo .....	4
2.3 Manejo dos solos e a dinâmica da matéria orgânica do solo .....	6
2.4 Mecanismos de estabilização da matéria orgânica no solo .....	8
2.4.1 Recalcitrância química .....	9
2.4.2 Interação organo-mineral .....	10
2.4.3 Proteção física .....	12
2.5 Avaliação da matéria orgânica do solo .....	13
2.6 Índice de manejo de carbono (IMC) .....	16
<b>3. OBJETIVOS GERAIS .....</b>	<b>18</b>
<b>4. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>19</b>
<b>5. ESTUDO I: O USO DE TFSA PARA O FRACIONAMENTO FÍSICO DENSIMÉTRICO INFLUENCIA A RECUPERAÇÃO DA FRAÇÃO LEVE OCLUSA?.....</b>	<b>24</b>
5.1 Introdução .....	24
5.2 Hipóteses .....	26
5.3 Objetivos .....	27
5.4 Material e métodos.....	27
5.5 Resultados e discussão .....	30
5.5.1 Variação na concentração de C das frações, e a relação com atributos do solo.....	31
5.5.2 Influência da subestimação de FLO em amostras 2,00 mm para avaliação de sistemas de manejo .....	34
5.6 Conclusões .....	39
<b>6. ESTUDO II: ESTOQUE E LABILIDADE DO CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO EM LATOSSOLOS DO CERRADO .....</b>	<b>40</b>
6.1 Introdução .....	40
6.2 Hipóteses .....	42
6.3 Objetivos .....	42
6.4 Material e métodos.....	42
6.4.1 Amostragem do solo .....	43
6.4.2 Fracionamento físico densimétrico da MOS .....	43
6.4.3 Índice de manejo de C e seus subíndices: índice de labilidade e de estoque de C.....	45

6.4.4	Análise estatística .....	45
6.5	Resultados e discussão .....	46
6.5.1	Variações no estoque de C do solo e das frações.....	48
6.5.2	Índice de manejo de carbono e seus sub-índices.....	55
6.6	Conclusões .....	58
<b>7.</b>	<b>ESTUDO III - AGREGAÇÃO DO SOLO E PROTEÇÃO FÍSICA DA MOS AFETADA POR DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM DOIS LATOSSOLOS DO CERRADO .....</b>	<b>60</b>
7.1	Introdução .....	60
7.2	Hipóteses .....	62
7.3	Objetivos .....	63
7.4	Material e métodos.....	63
7.4.1	Amostragem do solo .....	63
7.4.2	Estabilidade de agregados em água.....	64
7.4.3	Fracionamento físico densimétrico .....	65
7.4.4	Análise estatística .....	66
7.5	Resultados e discussão .....	66
7.5.1	Carbono orgânico e agregação do solo .....	66
7.5.2	Fracionamento físico.....	78
7.5.2.1	Concentrações de C e N nas frações e relação C:N .....	78
7.5.2.2	Estoques de C e N nas frações .....	83
7.5.2.3	Dinâmica do C e N nas frações da MOS e contribuições na variação total de C e N nos solos. ....	91
7.6	Conclusões .....	95
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
<b>9.</b>	<b>RESUMO BIOGRÁFICO .....</b>	<b>106</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Seqüência de culturas utilizadas nos experimentos de manejo.....	22
2. Dados gerais dos experimentos de manejo do solo das Fazendas da SCL Agrícola Ltda .....	23
3. Dados gerais dos solos utilizados nos testes de fracionamento .....	28
4. Concentração de carbono da fração leve livre (FLL) e da fração leve oclusa (FLO), utilizando o fracionamento físico densimétrico com amostras menores que 9,51 e 2,00 mm.....	31
5. Carbono da fração leve livre (C-FLL) da fração leve oclusa (C-FLO), e da soma das duas (C-FL), utilizando o fracionamento físico densimétrico com amostras menores que 9,51 e 2,00 mm.....	32
6. Subestimação da fração leve oclusa (FLO) e atributos do solo relacionados: carbono orgânico total do solo (COT), proporção de agregados entre 9,51 e 2,00 mm estáveis em água, índice de estabilidade de agregados (IEA).....	34
7. Estoques de carbono do solo (COT) e das frações físicas da matéria orgânica do solo (FL-fração leve e FP – fração pesada), em três Latossolos, sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e Cerrado (CE), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e no somatório das três camadas amostradas (0-20 cm).....	47
8. Variação no estoque de carbono do solo (COT) e das frações leve (C-FL) e pesada (C-FP) da matéria orgânica, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm, após conversão do CE para agricultura em PC (PC-CE), e de PC para PD (PD-PC). Entre parênteses, a variação do COT em base anual.....	49
9. Contribuição das frações leve (FL) e pesada (FP) no aumento do estoque de C do solo, com a conversão de preparo convencional para plantio direto, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm, dos três experimentos avaliados.....	54
10. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, para as subcamadas de 0-20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS. ....	69

11. Correlação entre as concentrações de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo inteiro com as frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP) da MOS, das três subcamadas de 0-20 cm.....	80
12. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) das frações da MOS e suas contribuições nos estoques totais de C e N do solo, para as subcamadas de 0–20 cm, em Luziânia-GO .....	84
13. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) das frações da MOS e suas contribuições nos estoques totais de C e N do solo, para as subcamadas de 0–20 cm, em Costa Rica-MS .....	85
14. Variação no estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo e das frações orgânicas, para a camada de 0-5 cm e 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e no LV em em Costa Rica-MS .....	92

## RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Mapa do Brasil com destaque para região do Cerrado (marron) e a localização das fazendas onde estão instalados os experimentos de longa duração utilizados neste estudo. .... 19
2. Dados médios da distribuição pluviométrica nos meses do ano das áreas experimentais de longa duração das fazendas da SLC agrícola localizadas no Maranhão (MA), Goiás (GO) e Mato Grosso do Sul (MS). Os valores entre parênteses correspondem à precipitação pluvial média anual, em milímetros. .... 20
3. Histórico das áreas experimentais, em Luziânia-GO, Costa Rica-MS e Tasso Fragoso-MA. Setas verticais indicam o ano de amostragem. ... 21
4. Variação no estoque de C da fração leve oclusa ( $\Delta$  C-FLO), obtida pela diferença entre o sistema de manejo com maior aporte de carbono ao solo e o com menor aporte, para cada solo avaliado, utilizando C-FLO obtida em fracionamento físico com amostras de 9,51 e 2,00 mm. .... 35
5. Proporção de C-FLO na fração leve (A) no carbono total do solo (B), em fracionamento físico com amostras de 9,51 e 2,00 mm. .... 37
6. Relação entre a variação de carbono da fração leve oclusa e do carbono do solo ( $\Delta$ C-FLO/ $\Delta$ COT). O  $\Delta$  é obtido pela diferença entre o sistema de manejo com maior aporte de carbono ao solo e o sistema com menor aporte, para cada solo avaliado, em amostras < 9,51 e < 2,00 mm. .... 38
7. Percentagem do estoque de carbono do solo na fração leve (FL) e fração pesada (FP) da MOS, no LVA-GO (Luziânia), LV-MS (Costa Rica) e LVA-MA (Tasso Fragoso). .... 51
8. Labilidade do C do solo em preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e Cerrado (CE), no LVA-GO em Luziânia, LV-MS em Costa Rica-MS e LVA-MA em Tasso Fragoso, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 0-20 cm. .... 56
9. Índice de estoque (IEC), de labilidade (ILC), e de manejo de carbono (IMC) em preparo convencional (PC), plantio direto (PD), utilizando o Cerrado como referência (100%), nos experimentos de Luziânia-GO, Costa Rica-MS e Tasso Fragoso-MA na camada de 0-20 cm. .... 57

10. Distribuição percentual da massa de agregados estáveis em água camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, no Latossolo Vermelho-Amarelo, em Luziânia-GO. ....	72
11. Distribuição percentual da massa de agregados estáveis em água, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, no Latossolo Vermelho, em Costa Rica-MS. ....	73
12. Distribuição dos agregados estáveis em água em classes de 9,51 – 2,00, 2,00 - 0,25 e < 0,25 mm, em Luziânia-GO (LVA) e em Costa Rica-MS (LV). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de aleatorização à 10% de probabilidade. ....	74
13. Diâmetro médio ponderado úmido (DMP) dos agregados do Latossolo Vermelho Amarelo em Luziânia-GO (LVA-GO) e Latossolo Vermelho em Costa Rica-MS (LV-MS), nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de aleatorização à 10% de probabilidade. ....	77
14. Concentração de carbono (C) e nitrogênio (N) das frações da MOS, para as subcamadas de 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS. ....	79
15. Relação C:N das frações da MOS, para as subcamadas de 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS. ....	81
16. Contribuição da camada de 0-5 cm nos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) da camada de 0-20 cm, nas três frações da MOS do LVA em Luziânia-GO e do LV em Costa Rica-MS. ....	90

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

A região do Cerrado é atualmente uma das maiores áreas de produção agrícola no Brasil, localizadas principalmente sob Latossolos, com agricultura em grande escala de principalmente das culturas de soja, milho e algodão. Na última década houve uma maior conscientização dos produtores para utilização de sistemas de manejo com menor revolvimento do solo. Porém, nesta região, devido à limitação de precipitação por três a cinco meses, não é possível manter o solo todo tempo com culturas em desenvolvimento, dificultando a manutenção de cobertura constante do solo e o incremento nos aportes de carbono ao solo.

A região do Cerrado brasileiro, a qual apresenta características favoráveis à agricultura em grande escala, passou por um acelerado processo de ocupação dos solos para fins de exploração agrícola, a partir da década de 70. No entanto, o uso intensivo dos solos com sistemas de manejo inadequados às condições de clima tropical, levou a degradação da qualidade do solo, principalmente devido a perdas de matéria orgânica do solo (MOS).

A redução da capacidade produtiva dos solos e os prejuízos causados ao meio ambiente pela adoção de sistemas de manejo inadequados às condições de solo e clima da região, e a limitada disponibilidade mundial dos recursos naturais, justifica a busca por sistemas de produção sustentáveis visando manter a capacidade produtiva dos solos agrícolas a longo prazo, com manutenção da qualidade do solo e do ambiente.

Além disso, o solo que é o principal meio de produção de alimentos, é um dos agentes reguladores dos grandes ciclos da biosfera terrestre, sendo fundamental para o funcionamento dos ecossistemas. Por ser um sistema aberto, os fluxos de matéria e energia regulam as trocas com o ambiente e os processos internos, onde os componentes interagem e se auto-organizam. Na

natureza, o solo encontra-se no seu estado estável, no entanto, após a retirada da vegetação nativa, os fluxos de matéria e energia se alteram, atingindo um novo nível que é altamente dependentes do sistema de uso e manejo.

Os sistemas de plantio direto (PD) que incluem leguminosas e gramíneas são eficientes no aporte de carbono e nitrogênio, pela participação das leguminosas que fixam nitrogênio e das gramíneas que tem capacidade de produção de grande quantidade de resíduo. No Cerrado, a principal rotação que inclui essas culturas é a de soja e milho. Porém, nos últimos anos aumentou a participação da cultura do algodão em rotação com a soja, ambas culturas com baixo aporte de resíduos ao solo, principalmente via sistema radicular, comparado as gramíneas. Assim, é importante conhecer a dinâmica da MOS neste sistema, para avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

Além dos estoques totais de MOS é importante avaliar sua distribuição nas diferentes frações físicas que permitem inferir sobre os mecanismos de estabilização da MOS. Estas frações apresentam particularidades quanto à função e composição, e localização na matriz do solo, e permitem um maior entendimento da dinâmica da MOS, principalmente relacionados a agregação, mineralogia e textura do solo, os quais influenciam principalmente a estabilização da MOS.

Apesar de alguns trabalhos já desenvolvidos na região do Cerrado, ainda existem muitas controvérsias sobre a dinâmica da MOS em sistemas de manejo com culturas anuais, e poucos estudos avaliaram a dinâmica e qualidade da MOS nas suas diferentes frações. Experimentos de longa duração e avaliações detalhadas da dinâmica e qualidade matéria orgânica podem contribuir para melhorar este conhecimento, dando suporte para inferir sobre a sustentabilidade do sistema produtivo nesta região.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Caracterização da região do Cerrado e do uso do solo**

O bioma Cerrado ocupa aproximadamente dois milhões de hectares, o que correspondem a 23% do território nacional, sob clima tropical. Devido sua abrangência em extensão, esta região compreende diferentes condições edafoclimáticas, padrões de vegetação e tipos de solo, que implicam em diferentes estoques de carbono no solo sob vegetação nativa.

O clima, segundo a classificação de Koeppen, é tropical estacional (Aw), com uma estação chuvosa e outra seca bem definida. As chuvas são concentradas de setembro/outubro a abril/maio, havendo períodos de três a seis meses com evapotranspiração efetiva menor que a precipitação, e uma precipitação anual de 600 a 2200 mm (Adámoli et al., 1987). A temperatura média anual varia entre 18 e 23 °C, dependendo da altitude e latitude (Macedo, 1996). No entanto, as temperaturas máximas podem chegar a 40°C em alguns locais.

Até a década de 70 os solos do Cerrado eram considerados impróprios para agricultura devido sua baixa fertilidade natural (Sanches & Logan, 1992). No entanto, o uso de fertilizantes e o melhoramento de plantas possibilitaram tornar estes solos altamente produtivos, levando ao avanço da agricultura nesta região. Além disso, as propriedades físicas dos solos e do relevo bastante favoráveis para agricultura mecanizada em larga escala, tornou esta região do Cerrado uma das áreas mais promissoras do país.

A ocupação dos solos resultou em progressiva substituição da vegetação nativa por pastagens cultivadas com criação de gado extensiva e lavouras (Resck et al, 2000), onde predominam o cultivo de soja e em menor

parte da área, milho, algodão e arroz de terras altas (IBGE, 2006). No entanto, o desenvolvimento de sistemas de manejo eficazes na manutenção da qualidade do solo nesta região não acompanhou o avanço da agricultura e pecuária, o que levanta importantes questões sobre a sustentabilidade dos agroecossistemas nesta região (Resende et al., 1996).

As condições edafoclimáticas da região do Cerrado favorecem a rápida decomposição da matéria orgânica e a perda de nutrientes, que associada à baixa fertilidade natural dos Latossolos (46% da região), podem ser limitantes a sustentabilidade de sistemas agrícolas intensivos. Entretanto, se corrigidas as deficiências químicas e utilizando sistemas de manejo como o PD, que minimiza as perdas de matéria orgânica, é possível a produção das culturas com menor impacto sobre o solo, e até promover melhorias no estoque e na labilidade do carbono em comparação aos sistemas tradicionais de manejo do solo (Corazza et al., 1999; Bayer et al., 2004, 2006a).

## **2.2 Matéria orgânica e a qualidade do sistema solo**

O solo é um elemento vital para funcionamento dos ecossistemas terrestres e a manutenção de sua qualidade é fundamental para a sustentabilidade dos ecossistemas. Na visão sistêmica, o solo pode ser entendido como um sistema aberto, resultado de complexas interações entre os subsistemas representados pelas plantas, minerais e fauna edáfica. Na natureza, estes subsistemas interagem entre si mantendo as trocas de matéria e energia em um nível estável, permitindo ao solo se organizar em níveis de ordem mais complexos (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003).

O bom funcionamento do sistema solo se caracteriza por um alto fluxo de energia e matéria, mantidos pela constante adição de resíduos orgânicos e condições favoráveis para manutenção da MOS no sistema. Conforme este fluxo, o sistema se auto-organiza em estados de ordem, os quais podem ser representados pela hierarquia de agregação do solo (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003). Segundo esses autores, quando os fluxos de entrada de matéria e energia para o sistema são altos, os componentes do solo se auto-organizam em níveis crescentes de ordem, com estruturas sucessivamente mais

complexas, surgindo às propriedades emergentes (ex. seqüestro de C, agregação, infiltração de água, etc) e o solo atinge qualidade.

Na agricultura e pecuária, a intensa exploração dos solos com manejo inadequado, tem levado a degradação de grandes áreas, especialmente sob climas tropicais e subtropicais, comprometendo a qualidade dos solos e a sustentabilidade da produção agrícola e do ambiente. Neste sentido, a avaliação da qualidade é importante para prever a sustentabilidade de um sistema de produção. Larson & Pierce (1994) propuseram um conjunto de variáveis químicas, físicas e biológicas como indicadores sensíveis ao manejo. Dentre estes, destaca-se a MOS por ser sensível às práticas de manejo, exercer função de pedotransferência entre os demais subsistemas e apresentar metodologia de avaliação acessível.

A MOS participa dos diversos processos químicos, físicos e biológicos nos solos, que incluem desde os processos de intemperismo e formação dos solos (Tan, 1986) até a formação de estruturas mais complexas, como os agregados (Mielniczuk et al., 2003). Entretanto, o manejo do solo influencia na quantidade e qualidade da matéria orgânica (Silva et al., 1994; Bayer et al., 2006a,b; Boeni, 2007; Bayer & Mielniczuk, 2008).

Em regiões de clima tropical e subtropical, com predomínio de minerais do tipo 1:1 e óxidos de Fe e Al como os Latossolos, a MOS é um componente fundamental da capacidade produtiva dos solos, representando uma parcela significativa da capacidade de troca de cátions (Silva et al., 1994), importante no armazenamento e suprimento de nutrientes para as plantas e a complexação de substâncias tóxicas, aumentando a capacidade de resiliência dos solos. A principal propriedade física influenciada pela MOS é a agregação, que afeta indiretamente a estrutura, a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água no solo. Para a biota do solo, a MOS é uma importante fonte de energia e nutrientes (Mendes et al., 2003).

Além da importância para os sistemas de produção, a MOS também influencia o ambiente global, participando das trocas gasosas entre o solo e atmosfera (Leite et al., 2004; Costa et al., 2008) e na qualidade da água (Mello, 2006), entre outros. No entanto, a maior ou menor contribuição da MOS no sistema solo e nas suas trocas de matéria e energia com ambiente, está diretamente relacionada a sua dinâmica nos solos.

### 2.3 Manejo dos solos e a dinâmica da matéria orgânica do solo

A matéria orgânica é composta por material de origem animal e vegetal, em vários estágios de decomposição, e também por produtos do metabolismo microbiano e exudados de raízes. De acordo com o tempo de permanência no solo e funções que desempenha no sistema, a matéria orgânica pode ser dividida em diferentes compartimentos: ativo, lento e passivo (Parton et al., 1987). Sua composição e distribuição do C nos diferentes compartimentos da MOS solo são influenciados pelo tipo de solo, condições ambientais, atividade microbiana, qualidade do resíduo, e sistema de preparo do solo.

Entender a dinâmica da MOS é fundamental para compreender as alterações que ocorrem no solo em função de um determinado tipo de manejo. Quando se altera o tipo de uso do solo, a dinâmica do sistema muda, alterando principalmente os estoques e qualidade da MOS (Corazza et al., 1999; Pillon, 2000, Bayer et al., 2000a,b, 2004, 2006a; Conceição, 2006; Boeni, 2007) e um novo estado de ordem é atingido dependendo do sistema de manejo (Vezzani, 2001). A participação da MOS nas propriedades do solo depende da qualidade, quantidade e distribuição desta em seus diferentes compartimentos (Woomer et al., 1994).

A dinâmica da MOS está intimamente ligada com os fluxos de matéria e energia do sistema e sua capacidade de se organizar. Para tentar explicar esta dinâmica, Dalal & Mayer (1986), utilizaram a seguinte equação:

$$dC/dt = k_1A - k_2C,$$

que expressa a variação nas suas taxas de adição e de perda no solo. A relação  $dC/dt$  é a variação anual no C total do solo em função do tempo  $t$ ;  $A$  representa o C fotossinteticamente adicionado ao solo na forma de resíduo, exsudados radiculares e raízes, expresso em  $t \text{ ha ano}^{-1}$ ;  $C$  é o estoque de C do solo, expresso em  $t \text{ ha}^{-1}$ ; os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  indicam, em base anual, a fração do C orgânico adicionado ( $A$ ) efetivamente retido na MOS (coeficiente de humificação) e a fração do C orgânico na MOS perdido pela decomposição microbiana, erosão e lixiviação, respectivamente (Bayer et al., 2006b, Bayer & Mielniczuk, 2008).

As adições de matéria orgânica no solo ( $A$ ) ocorrem principalmente via C fotossintetizado pelas plantas, que é adicionado ao solo em forma de resíduo

da parte aérea ou raízes, ou via exudados radiculares. Os resíduos orgânicos são primeiramente fragmentados e incorporados ao solo pela macro e mesofauna (Lavelle et al, 1997), e em seguida são transformados pelas enzimas extracelulares dos microrganismos (Sollins et al., 1996). Neste processo, parte do C é incorporado na MOS e outra parte é liberada para atmosfera na forma de CO<sub>2</sub> (Parton et al., 1997). Em sistemas naturais há um balanço entre as entradas e saídas de matéria orgânica mantendo-a em níveis estáveis no solo. As quantidades adicionadas ( $k_1A$ ) e perdas ( $k_2C$ ) nesse caso são iguais, mantendo uma relação  $dC/dt = \text{zero}$  ao longo do tempo. Em ambientes naturais, os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  são afetados principalmente pela temperatura, umidade, textura, mineralogia e qualidade do material, entre outros fatores (Mielniczuk et al., 2003; Bayer et al., 2006b; Bayer & Mielniczuk, 2008). Entretanto, quando a vegetação natural é convertida em outro tipo de uso do solo, além desses fatores, as práticas de manejo, especialmente o grau de revolvimento do solo, passam a ter grande influência sobre os fluxos de matéria orgânica para o solo (Mielniczuk et al., 2003).

Nos primeiros anos de cultivo, os solos geralmente apresentam um declínio acentuado nos estoques de MOS devido às maiores perdas ( $K_2C$ ) do que adições de C ( $K_1A$ ), tendendo com o passar do tempo sob o sistema de manejo adotado a um novo estoque estável de C no solo, devido à igualdade ( $K_1A = K_2C$ ), menor que o estoque inicial. Com a adoção de sistemas de manejo conservacionistas com alta adição de resíduos (A) e não revolvimento do solo (baixo  $K_2$ ) ocorre um acúmulo gradual de C no solo com o passar dos anos tendendo para um novo estoque estável, o qual será determinado pela relação entre as adições e perdas de C no solo ( $C = K_1A/K_2$ ). O estoque inicial de C no solo, a capacidade de um solo estabilizar a MOS, e o sistema de manejo adotado poderão ter grande influência sobre a quantidade de C perdida nos primeiros anos, de cultivo sob sistema de manejo convencional (Silva et al., 2004), bem como na taxa de recuperação da MOS quando sob sistema conservacionista (Mello, 2006). Neste sentido, em solos com baixos estoques iniciais de C pode-se esperar que as perdas sejam menores e a recuperação dos estoques para o estado original do solo seja mais facilmente alcançada.

Os dados de pesquisa produzidos na região do Cerrado com relação à influência do manejo nos estoques de carbono do solo demonstraram que

sistemas de manejo com intensivo revolvimento do solo podem causar reduções significativas nos estoques totais (Zinn et al., 2004; Silva et al., 2004). Por outro lado, solos em plantio direto podem apresentar maiores estoques de C quando comparados a solos em preparo convencional (Corazza et al., 1999; Leite et al., 2004; Bayer et al., 2006), embora esse efeito não seja sempre verificado (Roscoe & Buurman, 2003).

Na região do Cerrado, as chuvas são concentradas ocorrendo uma estação seca que varia de três a seis meses. Assim, neste período há dificuldade na produção vegetal e aporte de C do solo, o que associado à ampla adoção de culturas com baixo aporte de resíduos vegetais como a soja e algodão, resulta em baixos aportes anuais de C ao solo, o que caracteriza uma preocupação quanto à sustentabilidade da capacidade produtiva dos solos a longo prazo. Entretanto, a instalação de pastagens e cultivo do milho na rotação são fatores que ampliam o potencial dos sistemas em manter ou aumentar os estoques de MOS nesta região (Boeni, 2007; Salton et al., 2008). Bayer et al., (2006) verificaram que em média, os solos tropicais da região do Cerrado em PD apresentam taxas semelhantes de seqüestro de C dos solos temperados da América do Norte, cuja taxa de acúmulo é proporcional ao aporte anual de C pelas culturas. Portanto, é necessário estabelecer sistemas de manejo eficientes em adicionar carbono ao solo em PD visando acelerar a melhoria da qualidade do solo e ampliar as taxas de seqüestro de carbono.

Além do sistema de manejo, um fator que tem grande influência na dinâmica da MOS em Latossolos da região do Cerrado é a textura e mineralogia os quais afetam os mecanismos físicos e químicos que determinam a estabilização da MOS (Christensen., 1992).

#### **2.4 Mecanismos de estabilização da matéria orgânica no solo**

A estabilização da matéria orgânica pode ser entendida como um decréscimo do potencial de perda da MOS pela oxidação microbiana (Sollins et al., 1996). Quando um material orgânico é adicionado ao solo, o grau de decomposição e o tempo de permanência de cada fração originada serão determinados pela ação dos mecanismos de estabilização. Dentre eles está a recalcitrância química do material orgânico, a interação com superfícies

minerais e a proteção física (inacessibilidade aos organismos por oclusão). Todavia, no solo estes mecanismos atuam simultaneamente e dependem principalmente do manejo de solo, das condições climáticas e do tipo de solo (Sollins et al., 1996; Diekow, 2003; Roscoe & Buurman, 2003; Six et al., 2002). Desta forma, influenciam a capacidade de cada solo em estocar carbono nos diferentes compartimentos do solo (Pillon, 2000).

#### **2.4.1 Recalcitrância química**

A recalcitrância química compreende a complexidade da composição química do material orgânico, a qual pode ser devida às propriedades do material orgânico (qualidade do resíduo), ou ser adquirida durante o processo de decomposição dos compostos orgânicos (Six et al., 2002; Sollins et al., 1996). Estas características influenciam a degradação por microrganismos e suas enzimas.

No processo de decomposição, os microrganismos degradam seletivamente os compostos menos recalcitrantes, que demandam menor gasto energético, aumentando gradualmente a recalcitrância do resíduo remanescente (Sollins et al., 1996). Estudos monitorados por RMN  $^{13}\text{C}$  CP/MAS demonstram que com o aumento no grau de decomposição há uma redução na proporção de C O-alkil, indicando um consumo de polissacarídeos e um aumento relativo das estruturas de cadeias longas de C-alkil, C-aromático e C-carboxílico (Baldock et al., 1997; Pillon, 2000; Dieckow et al., 2005; Dick et al., 2005).

A composição química dos resíduos vegetais adicionados ao solo varia em função da espécie da planta e seu estágio de desenvolvimento (Pillon, 2000), e entre suas diferentes partes (Rasse et al., 2005). As raízes, por exemplo, são mais ricas em compostos aromáticos como a lignina, resultando numa menor taxa de decomposição que a parte aérea (Balesdent & Baladane, 1996). Além disso, a quantidade de nutrientes no composto orgânico, essencial ao metabolismo dos microrganismos, como N, P, Ca, podem afetar a taxa de decomposição.

Além dos resíduos vegetais, os produtos da síntese microbiana e da condensação abiótica também diferem quanto à sua recalcitrância. Entre os

microrganismos, os constituintes celulares dos fungos são mais resistentes à degradação que das bactérias (Sollins et al., 1996). Portanto, alterações na composição da população microbiana poderão refletir em variações na composição e recalcitrância dos produtos formados.

Entretanto, existem controvérsias sobre a importância quantitativa da recalcitrância como mecanismo de estabilização da MOS. Em sistemas de produção tecnificados, em solos tropicais onde as condições ambientais (temperatura e umidade) e a disponibilidade de nutrientes essenciais à população microbiana oferecem uma condição propícia à decomposição microbiana, estima-se que outras formas de proteção sejam as principais responsáveis pela manutenção da MOS. Em estudos de RNM  $^{13}\text{C}$  CP/MS, Dieckow et al. (2005) verificou que num Argissolo Vermelho em clima subtropical, a maior parte do carbono (47%) associado à fração argila é do tipo C O-alkil. Isto indica que compostos como carboidratos que são degradados preferencialmente estariam sendo protegidos por outros mecanismos como a associação organo-mineral e proteção física (Sollins, 1996; Christensen, 2001; Conceição, 2006). Talvez a natureza química do resíduo provenha uma manutenção a curto prazo do resíduo no solo, até que outra forma de proteção seja estabelecida (Six et al, 2002).

Apesar da questionável importância da recalcitrância química na manutenção de resíduos incorporados no solo (pela biota ou por implementos agrícolas), a recalcitrância química dos resíduos adicionados à superfície do solo pelas culturas pode ter grande influência no tempo de permanência destes sobre solo, que é fundamental a manutenção de cobertura constante sobre o solo.

#### **2.4.2 Interação organo-mineral**

Os compostos orgânicos originados no processo de biodegradação dos resíduos e dos exudados das plantas apresentam propriedades coloidais e podem ser adsorvidos à superfície das partículas minerais do solo (Christensen, 1992; Hassink, 1997; Baldock & Skjemstad, 2000). Esta interação intermolecular reduz a taxa de degradação desses compostos orgânicos (Sollins et al., 1996). A grande heterogeneidade da MOS implica na

possibilidade da ocorrência simultânea de diversos mecanismos envolvidos na interação com as superfícies dos minerais do solo (Deng & Dixon, 2002; Sollins et al, 1996). Esta interação é dependente da natureza intrínseca e das propriedades das espécies orgânicas, da carga e propriedades superficiais da fração mineral, conteúdo de água, cátions trocáveis, pH e outros fatores (Baldock & Skjemstad, 2000; Deng & Dixon, 2002), os quais irão determinar o tipo e a força da interação organo-mineral.

A magnitude da proteção coloidal apresenta estreita relação com as propriedades físicas e químicas da fração mineral (Deng & Huang, 2002). Dentre estas propriedades, as mais importantes são textura do solo (principalmente teor de silte e argila), mineralogia (tipo de mineral, cargas superficiais dominantes, grau de cristalinidade) e ASE (Hassink, 1997; Baldock & Skjemstad., 2000; Six et al., 2002). Em solos bastante intemperizados como os Latossolos, onde os minerais predominantes são caulinita e óxidos de Fe e Al (Kämpf et al., 2000), as superfícies disponíveis para ligação geralmente apresentam carga líquida positiva em pH predominante nos Latossolos. Nestas situações, espera-se que as principais reações sejam de coordenação e interações hidrofóbicas (Deng e Dixon, 2002).

A associação da MOS com minerais tem sido reportada como um dos principais processos para sua estabilização, reduzindo as taxas de perda de MOS em solos argilosos de clima tropical e subtropical. No entanto, a capacidade protetiva dos minerais pode ser finita e variável com o tipo de solo e do manejo (Roscoe et al., 2001; Dieckow, 2003, Bayer et al., 2004). O estoque e a dinâmica da matéria orgânica protegida pelas frações silte e argila depende da quantidade de matéria orgânica disponível para ser adsorvida, dos sítios disponíveis para adsorção, e da magnitude da proteção coloidal exercida pelas superfícies minerais (Christensen, 1992, Baldock & Skjemstad, 2000; Six et al., 2002).

No solo, há constante liberação de compostos orgânicos que podem ser adsorvidos as superfícies minerais, e com o passar do tempo estas superfícies podem ser saturadas (Roscoe et al., 2001; Dieckow, 2003). Eusterhues et al. (2005), trabalhando com minerais sintetizados, revela que estes podem adsorver até 3 vezes mais que sua ASE permitiria, provavelmente pelas interações hidrofóbicas. Segundo esses autores, a porosidade dos

agregados, a quantidade de cargas superficiais e o pH dos solos também podem influenciar. A agregação do solo pode reduzir a área disponível para reações de superfície (Kaiser & Guggenberger, 2003), porém esta redução nem sempre corresponde à quantidade de MOS adsorvida.

### **2.4.3 Proteção física**

A matéria orgânica, principalmente em estágios iniciais de decomposição, pode ser alocada no interior de agregados do solo, os quais atuam como uma barreira física ao acesso dos microorganismos e suas enzimas (Sollins et al, 1996; Balesdent et al, 2000; Six et al., 2002), e diminuem a disponibilidade de O<sub>2</sub> para os processos oxidativos de decomposição (Ashman et al., 2003). A proteção física é importante para manutenção e aumento nos estoques de matéria orgânica particulada (MOP), a qual tem baixa recalcitrância e pouca interação com minerais do solo (Dieckow, 2003; Bayer et al., 2004). Todavia, a magnitude desta proteção está diretamente relacionada aos processos de formação e estabilização de agregados (Oades, 1984; Baldock & Skjemstad, 2000; Six et al., 2000a, 2002 e 2004; Pulleman et al., 2005), os quais são variáveis com a textura e mineralogia do solo, o sistema de preparo (Castro Filho et al., 2002; Conceição, 2006), a qualidade e quantidade do material orgânico adicionado (Boeni, 2007) e atividade biológica do solo (Mendes et al., 2003; Haynes & Beare, 1997). O mínimo revolvimento do solo no sistema de PD resulta em menor destruição dos agregados e permite maior acúmulo e proteção da MOS por oclusão (Conceição, 2006; Roscoe et al., 2006; Boeni, 2007).

O efeito do manejo é maior em macroagregados, os quais são estabilizados pela ação das raízes das plantas e hifas de fungos (Silva & Mielniczuk, 1997; Mielniczuk et al., 2003; Rasse et al., 2005; Gryse et al., 2005), enquanto que os microagregados, principalmente em Latossolos, tem alta estabilidade e são pouco afetados pelo manejo. Nestes solos, os principais agentes agregantes de microagregados seriam os óxidos de Fe e Al (Tildall e Oades., 1992; Pinheiro-Dick & Schwertmann, 1996; Ferreira et al., 1999, Vitorino et al., 2003, Castro Filho et al., 2002). Por esta razão, teríamos uma parte da MOS protegida entre agregados menores, na estrutura de um

macroagregado, que seria mais dinâmica, tanto nas perdas pela destruição dos macroagregados como na incorporação de MOS durante a formação de estruturas maiores de agregados.

Considerando a tendência de saturação dos sítios disponíveis para ligação das superfícies minerais (Roscoe et al., 2001; Dieckow, 2003), a proteção física é um mecanismo de grande importância, visto que adições crescentes de matéria orgânica ao solo são possíveis aumentando o estoque de matéria orgânica protegida no interior dos agregados.

## **2.5 Avaliação da matéria orgânica do solo**

A importância da matéria orgânica no funcionamento dos ecossistemas tem despertado a comunidade científica para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de diversas técnicas para avaliação quantitativa e qualitativa da MOS e de seus compartimentos, visando o entendimento de sua dinâmica nos solos.

Quantitativamente pode-se avaliar o estoque total de MOS no solo inteiro ou em diferentes frações. De maneira geral, o fracionamento químico permite obter as quantidades de substâncias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina). Por outro lado, através do fracionamento físico é possível separar e quantificar frações da MOS associadas à matriz mineral (mais decomposta) e frações lábeis (MOS particulada) constituídas de resíduos em estágios iniciais de decomposição. Esta técnica tem sido utilizada com sucesso para identificar as variações determinadas pelo manejo do solo.

O fracionamento físico para caracterização da MOS tem se mostrado uma ferramenta promissora em estudos de mudanças de uso do solo (Christensen, 1992). Esta técnica apresenta como vantagem o fato de ser menos agressiva à estrutura da matéria orgânica do que os métodos químicos, e por isso tem sido muito utilizado em estudos de quantificação e caracterização qualitativa dos compartimentos da MOS (Cambardella & Elliott, 1992; Christensen, 1992; Golchin et al., 1994a; Roscoe & Machado, 2002), principalmente para avaliação do efeito de sistemas de manejo do solo na dinâmica e qualidade da MOS (Freixo et al., 2002; Dieckow et al., 2005; Bayer, 2004; Salton, 2005; Conceição, 2006; Boeni, 2007), e na modelagem do

carbono (Mielniczuk et al., 2003; Leite et al., 2004). De maneira geral, através do fracionamento físico separa-se frações orgânicas por tamanho (granulométrico) ou densidade (densimétrico), ou uma combinação de ambos.

No fracionamento físico granulométrico a separação das frações é feita por peneiramento, sendo necessária a máxima dispersão dos agregados maiores do que a malha da peneira (53  $\mu\text{m}$ ) e a mínima fragmentação das partículas orgânicas, para evitar que haja redistribuição entre as frações (Cambardella & Elliot, 1992; Bayer, 1996; Roscoe & Machado, 2002; Dieckow, 2003). Após a dispersão do solo por agitação mecânica em solução dispersante, a MOS maior que 53  $\mu\text{m}$  é separada por peneiramento, juntamente com as partículas de areia (Christensen, 1992; Cambardella & Elliott, 1992). Esta fração constitui a matéria orgânica particulada (MOP), composta de fragmentos de resíduos orgânicos frescos ou em estágio inicial de decomposição que correspondem ao compartimento lábil da MOS. A MOS de tamanho menor que 53  $\mu\text{m}$ , juntamente com as partículas minerais de tamanho silte e argila pode ser quantificada pela diferença entre a MOP e o total de MOS do solo. Caso haja interesse na caracterização da MOS associada aos minerais, esta fração pode ser recuperada por decantação. Ou ainda, por separação dos tamanhos silte e argila, por diferença no tempo de sedimentação (Lei de Stokes). No entanto, parte da MOP menor que 53  $\mu\text{m}$  pode ser recuperada na fração silte, como fragmentos de plantas ou carvão (Dieckow, 2003; Roscoe & Burmann et al., 2003). Isto pode dificultar a categorização da labilidade deste compartimento para uso em modelos de dinâmica da MOS.

O fracionamento físico densimétrico compreende a separação das frações da MOS de acordo com sua densidade e a força utilizada para dispersão dos agregados. As soluções densas utilizadas variam de densidades 1,0 até 2,4  $\text{g dm}^{-3}$ , preparadas em geral com sais de iodeto de Na ( $\text{NaI} \leq 1,8 \text{ g dm}^{-3}$ ) ou politungstato de sódio  $[(\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}).\text{H}_2\text{O})]$ . De acordo com a densidade da solução, a MOS é separada basicamente em fração leve (FL) e pesada (FP), que diferem quanto à sua estrutura e funcionalidade (Christensen, 1992). A FL pode ainda ser separada em FLL e FLO, de acordo com a força utilizada para dispersar os agregados.

A FLL é composta por fragmentos de planta frescos ou parcialmente decompostos, hifas de fungos e carcaça de organismos da fauna do solo. Esta fração corresponde ao compartimento lábil, o qual é mais sensível ao manejo e constitui uma importante fonte de energia e nutriente para o sistema solo e seus subsistemas (Christensen, 1992; Roscoe & Machado, 2002). Enquanto que a FLO apresenta um grau de decomposição mais avançado que a FLL, e também mais rica em carbono. A FLO representa a fração da matéria orgânica, não associada aos minerais, protegida no interior dos agregados, e por isso com uma taxa de ciclagem mais lenta que a FLL. A quantidade de FLL e FLO pode variar com o tipo de solução densa utilizada (Conceição et al., 2007) e a energia utilizada para a dispersão do solo (Christensen, 1992; Roscoe & Machado, 2002).

Devido à rápida taxa de mineralização da matéria orgânica particulada no solo ela é uma importante fonte de nutrientes lábeis às plantas. Por outro lado, ela tem sido utilizada como indicador das mudanças na quantidade de matéria orgânica lábil devido ao tipo de manejo e outros fatores que afetam a atividade microbiana (Christensen, 1992). Em solos minerais, a fração leve representa uma pequena parte da massa total do solo, mas armazena quantidades significativas de carbono e nitrogênio (Roscoe & Machado, 2002). Entretanto, em áreas com queimadas frequentes a FL pode conter significativas quantidades de material carbonizado ou parcialmente carbonizado (Schmidt e Noack, 2000; Skjemstad et al., 1996, Tomazi, 2004). Isto pode alterar a composição e funcionalidade desta fração no sistema, pois os materiais carbonizados são muito recalcitrantes e podem permanecer por muitos anos no solo.

A FP é fração da MOS corresponde à matéria orgânica associada aos minerais, composta por resíduos orgânicos em elevado grau de decomposição, com baixa taxa de mineralização e uma elevada densidade específica em função dessa associação com as partículas minerais do solo (Christensen, 1992; Roscoe & Machado, 2002; Boeni, 2007). Em função do elevado tempo de residência no solo, a FP compreende o compartimento passivo da MOS, que armazena a maior parte do estoque de C do solo, e sua contribuição aumenta com a profundidade.

## 2.6 Índice de manejo de carbono (IMC)

A utilização de sistemas de manejo que promovem a qualidade do solo é fundamental para sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola e do ambiente (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003). A MOS tem sido utilizada como um bom indicador de qualidade do solo pela sua sensibilidade às práticas de manejo do solo e pela sua participação relevante nos processos químicos, físicos e biológicos do solo (Larson & Pierce, 1994). Desta forma, é importante o estabelecimento de índices para avaliar a capacidade do sistema de manejo em promover a qualidade do solo e a sustentabilidade do agroecossistema. Dentre os vários índices propostos, Blair et al. (1995) sugeriram um Índice de Manejo de Carbono (IMC), baseado em aspectos qualitativos (labilidade) e quantitativos (estoque de carbono) da MOS. Para o cálculo comparativo é utilizada uma condição de referência, geralmente uma área de vegetação nativa, para a qual considera-se o  $IMC = 100$ .

O “IMC” é obtido pelo produto entre um Índice de Estoque de Carbono (IEC) e um Índice de Labilidade do C (ILC), como descrito abaixo:

$$IMC = IEC \times ILC \times 100, \text{ onde:}$$

$IEC$  = estoque de C do tratamento / estoque total de C da referência ,

$ILC$  = labilidade (L) do C do tratamento / labilidade do C da referência.

$LC$  = estoque de C da fração leve (ou particulada) / estoque de C da fração pesada (ou associada à minerais).

Na proposta original de Blair et al. (1995), a labilidade do carbono é obtida pela oxidação da MOS com  $KMnO_4$ . A fração oxidada foi chamada de matéria orgânica lábil e a outra fração chamada de matéria orgânica não lábil, obtida pela diferença entre o C total e o C oxidado. Porém, a concentração de  $KMnO_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$  pode promover a oxidação de um percentual da fração não lábil da MOS do solo, o qual é variável entre diferentes tipos de solo, exigindo assim uma calibração para cada solo, o que limita em parte a utilização do IMC. Uma alternativa para determinação da labilidade do C foi proposta por Dieckow et al. (2005), utilizando as frações lábeis da MOS obtidas pelo fracionamento físico densimétrico (fração leve,  $< 1,8 \text{ cm}^{-3}$ ) ou granulométrico (fração particulada,  $> 53 \text{ }\mu\text{m}$ ). Vieira et al. (2007) correlacionaram o C lábil obtido pelo fracionamento físico densimétrico e

granulométrico da MOS e o C lábil obtido pela oxidação química da MOS e verificaram que a concentração de  $\text{KMnO}_4$   $60 \text{ mmol L}^{-1}$  seria a adequada para oxidar a fração lábil da MOS. Além disso, estes autores verificaram uma boa relação entre o IMC calculado utilizando o método da oxidação química e o método de fracionamento físico para obtenção da fração lábil.

Estudos conduzidos em região subtropical (Dieckow, 2003; Zanatta, 2006; Vieira et al., 2007) e tropical (Salton et al., 2008) observaram que o ILC foi mais sensível para detectar diferenças entre sistemas de manejo do solo que o IEC. Comparando os sistemas de preparo PC e PD com mesmo aporte de resíduo, Zanatta (2006) verificou um aumento de 5 vezes no ILC no PD, enquanto que no IEC este aumento foi inferior a 2 vezes. O IMC como uma função do estoque e labilidade do carbono tem apresentado boa relação com a qualidade do solo e suas propriedades emergentes, e é sensível para detectar diferenças entre os sistemas de preparo do solo (Zanatta, 2006; Vieira et al. 2007; Salton, 2006)

### **3. OBJETIVOS GERAIS**

Avaliar a influência do sistema de plantio direto sobre as mudanças no estoque de MOS e nas suas frações (leve livre, leve oclusa e associada a minerais), em cultivo com rotação milho/soja/algodão em Latossolos da região do Cerrado.

Fazer inferências sobre a resistência destes solos às alterações induzidas pelo sistema de cultivo utilizado na região.

#### 4. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O bioma Cerrado ocupa uma área expressiva do território brasileiro, apresentando condições edafoclimáticas e de solo próprias. Por isso, para melhor caracterizar as variações na qualidade da matéria orgânica em sistemas de produção milho/soja/algodão no Cerrado, a pesquisa foi realizada em experimentos de longa duração conduzidos a campo, em três fazendas do grupo SLC Agrícola Ltda, situadas em locais representativos do Cerrado (Figura 1).

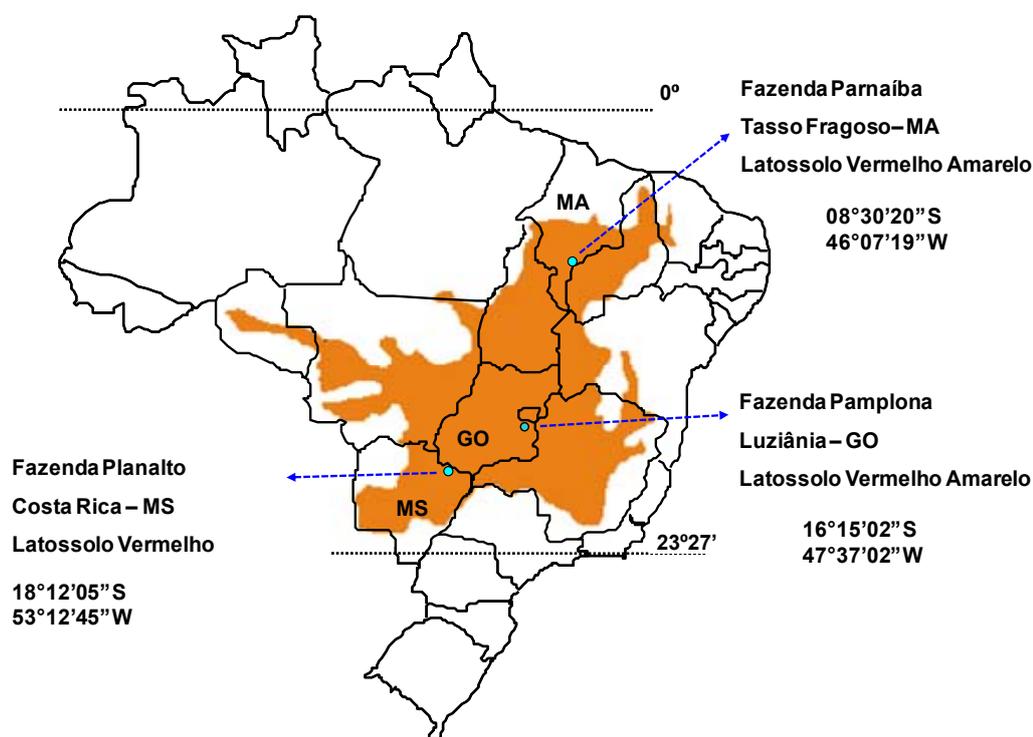


Figura 1. Mapa do Brasil com destaque para região do Cerrado (marron) e a localização das fazendas onde estão instalados os experimentos de longa duração utilizados neste estudo.

Na Figura 2 estão os dados de precipitação pluviométrica das três fazendas onde estão implantados os experimentos de longa duração. Em todas as áreas a chuva é mal distribuída durante o ano, sendo concentrada no verão. Nas áreas localizadas em Tasso Fragoso-MA e Luziânia-GO por cinco meses no ano (maio a setembro) chove menos que 60 mm de chuva, abaixo do qual é considerado um mês seco (INMET), com problemas para desenvolvimento de culturas anuais. Por outro lado, de outubro a abril ocorrem 87%, 86% e 81% do volume de chuvas do ano, respectivamente, em Tasso Fragoso-MA, Luziânia-GO e Costa Rica-MS.

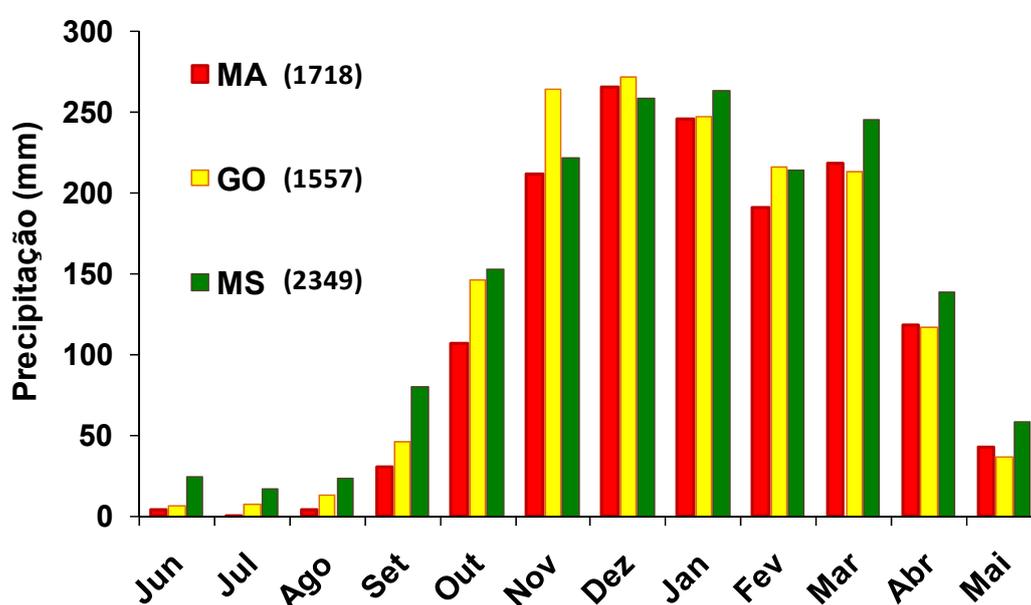


Figura 2. Dados médios da distribuição pluviométrica nos meses do ano das áreas experimentais de longa duração das fazendas da SLC agrícola localizadas no Maranhão (MA), Goiás (GO) e Mato Grosso do Sul (MS). Os valores entre parênteses correspondem à precipitação pluvial média anual, em milímetros.

As três áreas experimentais estão localizadas em fazendas de produção comercial de grãos, que passaram pelo processo tradicional de abertura de áreas agrícolas da região com derrubada e queima do Cerrado. Estas áreas foram inicialmente cultivadas com arroz (1º a 2º anos iniciais) e em seqüência soja em preparo convencional até a implantação do experimento, a qual ocorreu no ano 1992 em Luziânia, 1994 em Costa Rica e 2000 em Tasso Fragoso (Figura 3).

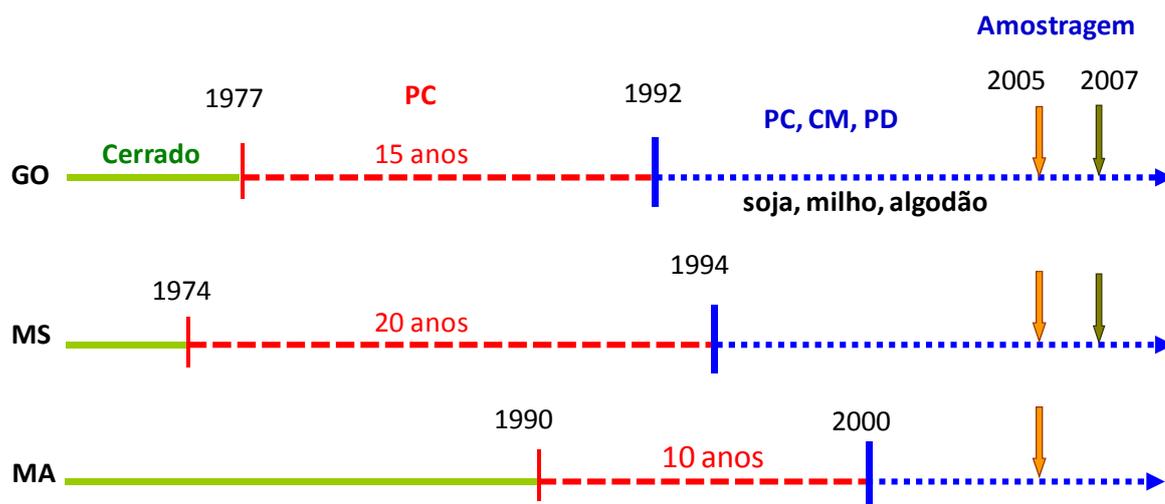


Figura 3. Histórico das áreas experimentais, em Luziânia-GO, Costa Rica-MS e Tasso Fragoso-MA. Setas verticais indicam o ano de amostragem.

Os experimentos são compostos por três sistemas de preparo do solo: preparo convencional (PC) que consta de uma gradagem pesada, uma gradagem média e uma gradagem niveladora; cultivo mínimo (CM) que consiste de uma escarificação ou gradagem pesada em junho ou agosto e manejo químico das invasoras em pré-plantio; e o plantio direto (PD) que consiste da dessecação da cobertura de milho ou das invasoras (cobertura fraca e desuniforme).

Cada sistema de preparo tem três repetições de campo, nas quais foi realizado uma safra no ano, incluindo as culturas de soja, milho e algodão, as quais representam as principais culturas produzidas em solos do Cerrado. Um histórico das culturas utilizadas nos experimentos está na Tabela 1. O milho foi utilizado na rotação até o ano de 2004, a partir do qual o experimento passou a ser conduzido somente com a rotação soja/algodão a fim de avaliar o efeito destas culturas a longo prazo em trabalhos futuros.

Os dados referentes à textura e mineralogia dos solos das áreas experimentais estão na Tabela 2. A energia necessária para dispersão de 99% do solo em partículas simples foi determinada pela curva de dispersão com valores crescentes de energia e quantidade de argila obtida.

Neste item foram descritos os materiais e métodos gerais relacionado aos estudos II e III. Maiores detalhes sobre amostragem de solo e análises laboratoriais optou-se por abordar separadamente para em cada estudo visto que estes diferem entre si. No estudo I foi realizado um experimento em laboratório,

com solos de vários experimentos utilizados pelo grupo de pesquisa em Manejo do Solo da UFRGS, portanto será descrito somente naquele estudo.

Tabela 1. Seqüência de culturas utilizadas nos experimentos de manejo.

<b>Ano agrícola</b>	<b>Luziânia</b>	<b>Costa Rica</b>	<b>Tasso Fragoso</b>
1992/1993	Soja		
1993/1994	Soja		
1994/1995	Milho	Milho	
1995/1996	Soja	Soja	
1996/1997	Soja	Milho	
1997/1998	Milho	Soja*	
1998/1999	Soja	Algodão*	
1999/2000	Milho	Soja	Soja*
2000/2001	Soja	Milho	Milho*
2001/2002	Milho	Algodão	Algodão*
2002/2003	Soja	Soja	Soja*
2003/2004	Milho	Milho	Milho*
2004/2005	Soja	Algodão	Algodão
2005/2006	Algodão	Soja	Soja
2006/2007	Soja	Algodão	Algodão

\*Anos em que foi feito plantio do milheto para cobertura do solo no sistema de plantio direto.

Tabela 2. Dados gerais dos experimentos de manejo do solo das Fazendas da SCL Agrícola Ltda

Município-Estado	Classificação do solo	Energia para dispersão J mL <sup>-1</sup>	Argila <sup>1</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----			$\frac{Gb^2}{Gb+Ct}$	$\frac{Gt^2}{Gt+Hm}$
				Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	Al <sub>o</sub>		
Luziânia-GO	LVA	1096	880	43,4	1,04	0,02	0,68	0,87
Costa Rica -MS	LV	407	861	65,3	2,50	0,42	0,50	0,14
Tasso Fragoso - MA	LVA	407	270	21,3	0,74	0,81	0,03	0,96

LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; LV = Latossolo Vermelho; Gb = gibbsita, Ct = caulinita, Gt = goethita, Hm = hematita.

<sup>1</sup> Teor de argila obtido pela curva de dispersão do solo com ultra-som.

<sup>2</sup> Os dados de mineralogia foram obtidos em Tonin et al. (2007) para solo de Costa Rica e em Inda Junior (dados não publicados) para os demais solos.

## **5. ESTUDO I: O USO DE TFSA PARA O FRACIONAMENTO FÍSICO DENSIMÉTRICO INFLUENCIA A RECUPERAÇÃO DA FRAÇÃO LEVE OCLUSA?**

### **5.1 Introdução**

Os métodos de fracionamento físico tem sido utilizados amplamente no estudo da MOS principalmente para avaliação do efeito de sistemas de manejo do solo na dinâmica e qualidade da MOS (Freixo et al., 2002; Roscoe & Burman, 2003; Dieckow et al., 2005; Bayer et al., 2004, 2006; Salton, 2005; Boeni, 2007; Conceição et al, 2008). Diversos métodos de fracionamento físico foram desenvolvidos ao longo dos anos, porém não há uma padronização na utilização dos métodos, o que dificulta a comparação de resultados. De maneira geral, as frações orgânicas são separadas por tamanho (granulométrico) ou densidade (densimétrico), ou por uma combinação de ambos.

Especificamente, o método densimétrico baseia na separação das frações orgânicas com base na diferença de densidade entre a fração leve (FL) e a fração pesada (FP) da MOS, utilizando soluções com densidade variando de 1,0 a 2,4 g cm<sup>-3</sup> (Christensen, 1992, Golchin et al., 1994; Roscoe & Machado, 2002; Boeni, 2007; Conceição et al, 2007, 2008). A FL pode ser separada em FL livre ou inter-agregados (FLL) e oclusa ou intra-agregados (FLO). As três frações (FLL, FLO e FP) desempenham diferentes funções de acordo com sua localização na matriz do solo e permitem fazer inferências sobre a atuação dos mecanismos de estabilização da MOS (recalcitrância intrínseca, proteção física e interação com minerais do solo) (Christensen., 1992; Golchin et al., 1994, Conceição et al., 2008). A proteção física é

dependente do processo de formação de agregados estáveis, que incorpora a MOS no interior da sua estrutura e aumenta o tempo de permanência da matéria orgânica no solo, enquanto que a manutenção da estabilidade dos agregados (principalmente dos macroagregados) é dependente da atividade do sistema radicular e das hifas de fungos (Haynes & Beare, 1997; Silva & Mielniczuk, 1997). Devido à importância da proteção física da MOS no interior dos agregados, aumentando a labilidade da MOS e a capacidade do solo em estocar carbono, a FLO é bastante utilizada na avaliação de sistemas de manejo do solo. Assim, a acurácia na separação das frações é fundamental para utilização da FLO como indicadora da capacidade de um sistema de manejo em proteger a MOS.

Avanços metodológicos têm contribuído para melhorar a eficiência do fracionamento físico densimétrico, no entanto, pouca atenção tem sido atribuída a fatores como a granulometria inicial da amostra de solo para o fracionamento físico, o qual pode ter grande importância na determinação da FLO, visto que esta é dependente do grau de agregação do solo. Neste sentido, é importante que durante a separação da FLL os agregados sejam mantidos intactos para que não haja a liberação da FLO para a solução, e conseqüentemente esta seja recuperada junto com a FLL, subestimando a quantidade de FLO.

Em solos ricos em óxidos, como os Latossolos e Argissolos, sob vegetação natural ou sistemas de manejo conservacionistas, que incluem gramíneas na rotação, a massa de agregados de diâmetro maior que 2 mm podem representar mais que 50% da massa de agregados e um índice de estabilidade de agregados de até 0,95 (Silva e Mielniczuk, 1997; Conceição et al., 2005; Madari et al., 2005; Salton et al., 2007; Boeni, 2007). A alta estabilidade destes agregados indica que estes podem manter-se estáveis durante a separação da FLL que envolve apenas uma leve agitação manual para liberação do FLL (Conceição et al., 2008).

Dessa forma, o preparo inicial da amostra pode ter grande importância na avaliação da FLO, podendo ocorrer uma variação nas quantidades de FLO recuperada de um mesmo tipo de solo em função da granulometria inicial da amostra. No caso da utilização de amostras de terra fina seca ao ar (TFSA), o preparo envolve destorroamento para passar na peneira de 2,00 mm, o que

causa o rompimento dos agregados maiores que 2,00 mm, podendo liberar parte da MOS protegida entre os agregados de tamanho 2,00 a 9,51 mm e esta ser quantificada como FLL, visto que a separação entre as duas frações se dá unicamente por diferença de densidade e seqüencia de dispersão.

Além da possibilidade de ocorrer subestimação da FLO com utilização de TFSA, esta subestimação pode variar de acordo com as propriedades do solo relacionadas com agregação e proteção física como quantidade de MOS, estabilidade de agregados, entre outros.

Na literatura, encontra-se análises de fracionamento físico com amostra fracionamento com amostra < 2,00 mm (Golchin et al., 1994a, Roscoe & Machado, 2003) até amostras com agregados < 19 mm (Roscoe et al., 2006). Porém, não existem estudos sobre como a recuperação da FLO pode ser afetada pela granulometria inicial da amostra. Devido à alta relação da FLO com agregação do solo (Conceição, 2006) espera-se que quanto maior a quantidade de agregados grandes e o índice de estabilidade destes, maior seria a subestimação da FLO. Neste sentido, realizou-se um estudo comparativo entre duas granulometrias de amostra, 2,00 e 9,51 mm de diferentes solos, com sistemas de manejo distintos, para verificar as quantidades de C obtido na FLL e FLO, relacionar a subestimação da FLO com fatores que influem no acúmulo e proteção da FLO e inferir sobre a influência da granulometria da amostra na utilização do fracionamento físico densimétrico para avaliação da qualidade de sistemas de manejo do solo.

## **5.2 Hipóteses**

O fracionamento físico com amostras de solo com granulometria < 2,00 mm pode levar a subestimação da FLO obtida, em comparação à amostra de agregados com granulometria < 9,51 mm;

Esta subestimação é mais acentuada em solos com maiores estabilidade de agregados e teores de MOS.

### 5.3 Objetivos

Comparar as quantidades de carbono obtido na FLL e FLO com fracionamento físico densimétrico a partir de amostras com granulometria menores que 2,00 e 9,51 mm, em diferentes solos, com diferentes sistemas de manejo.

Verificar a influência da granulometria da amostra na utilização do fracionamento físico densimétrico para avaliação da qualidade de sistemas de manejo do solo.

Relacionar a subestimação da FLO com fatores que influem no acúmulo e proteção da FLO.

### 5.4 Material e métodos

Informações gerais dos solos utilizados neste estudo estão descritas na Tabela 3. Visando identificar o efeito granulometria da amostra, em cada solo avaliado, utilizou-se dois sistemas de manejo contrastantes quanto ao estoque de C do solo e agregação.

Amostras da camada de 0-5 cm foram coletadas em trincheiras de 40x40x30 cm, em blocos indeformados de solo, com auxílio de pá e espátula, incluindo três repetições de campo em cada sistema de manejo do solo (Tabela 3). Os blocos de solo foram desagregados manualmente até toda amostra passar pela peneira de 9,51 mm e secos ao ar e a sombra por 72 h.

Para facilitar a obtenção de uma subamostra homogênea para o fracionamento físico, aproximadamente 100 g de agregados < 9,51 mm foram cuidadosamente peneirados à 2,00 mm, e quantificada a massa de agregados em cada parte (> 2 mm e < 2 mm). A partir da proporção de cada parte compôs-se duas porções de 10g. Uma delas foi utilizada diretamente para o fracionamento físico e a outra, antes do fracionamento, foi destorroada com rolo de madeira até toda amostra passar em peneira de 2,0 mm visando simular o efeito do preparo das amostras de terra fina seca ao ar (< 2,00 mm). Todos os resíduos orgânicos liberados pela quebra dos agregados durante a moagem, e que ficaram retidos na peneira, foram incluídos na amostra para não reduzir o total de FL.

Tabela 3. Dados gerais dos solos utilizados nos testes de fracionamento

Solo (Local)	Temperatura média anual (°C)	Uso do solo anterior ao experimento	Tempo de experimento (anos)	Precipitação média anual (mm)	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Energia dispersão (J mL <sup>-1</sup> )	Sistemas de manejo do solo	
							Baixa adição C	Alta adição C
PV-ES (Eldorado do Sul-RS) *	19,4	15 anos de PC	18	1440	220	250	PC (A/M) <sup>1</sup>	PD (AV/MC) <sup>2</sup>
LV-CG (Campo Grande-MS) **	23	20 anos de PP -Bd degradada	11	1635	360	800	PC (S) <sup>3</sup>	PP (Bd) <sup>4</sup>
LV-D (Dourados-MS)**	23	20 anos de PC (arroz, milho, soja)	9	1545	620 e 670	450	PD (NM/AS/TS) <sup>5</sup>	PP (Bd) <sup>4</sup>
LV-M (Maracajú-MS)**	23	1 ano de PC	11	1527	530	530	PD (S/A) <sup>6</sup>	PP (Bd +Sg) <sup>7</sup>
LV-CR (Costa Rica-MS)***	24	20 anos em PC	13	2349	861	407	PC (S/A) <sup>8</sup>	PD (S/A) <sup>9</sup>

PV - Argissolo Vermelho ; LV - Latossolo Vermelho; Energia de dispersão (J mL<sup>-1</sup>) - obtida pela curva de dispersão de argila.

\* Informações obtidas em Conceição (2006); \*\* Informações obtidas em Boeni (2007) e Salton (2005); \*\*\* Informações do estudo III desta tese.

<sup>1</sup> Preparo convencional de aveia preta (*Avena strigosa*) no inverno e milho (*Zea mays*) no verão;

<sup>2</sup> Plantio direto de aveia + vicia (*Vicia sativa* L.) no inverno e milho + caupi (*Vigna unguiculat* (L) Walp) no verão;

<sup>3</sup> Plantio convencional de soja no verão;

<sup>4</sup> Pastagem permanente de gramínea (*Brachiaria decumbens*).

<sup>5</sup> Plantio direto em sistema de rotação de culturas trianual, incluindo culturas de inverno e verão: nabo (*Raphanus sativus*)/milho-aveia preta/soja (*Glycine Max*)-trigo (*Triticum aestivum*)/soja;

<sup>6</sup> Plantio direto de soja no verão e aveia preta no outono/inverno;

<sup>7</sup> Pastagem permanente de gramínea (*Brachiaria decumbens*) consorciada com leguminosa (*Stylosanthes guianensis*);

<sup>8</sup> Preparo convencional em rotação soja/ algodão/ milho no verão;

<sup>9</sup> Plantio direto em rotação soja/ algodão/ milho no verão.

A energia necessária para dispersar 99% dos agregados do solo em partículas simples (Tabela 3), foi determinada em testes preliminares, através de uma curva de dispersão de argila em função da energia aplicada ( $\text{J mL}^{-1}$ ).

Ambas granulometrias de amostra (9,51 e 2,00 mm) foram submetidas ao fracionamento físico densimétrico, obtendo-se as frações FLL, FLO e FP. Para isso, 10 g de solo foram colocadas em um tubo de centrifuga (100 mL) com 80 mL de politungstato de sódio ( $2 \text{ g cm}^{-3}$ ), que foi vedado com rolha de borracha e invertido lenta e manualmente por cinco vezes para liberação da FLL (MOS localizada entre os agregados) com mínimo rompimento dos agregados. A suspensão foi centrifugada a 2000 g por 90 minutos, para decantar a fração mineral e formar um “pellet” no fundo do tubo, possibilitando verter o sobrenadante contendo a FLL, em um sistema de filtração a vácuo contendo filtro de fibra de vidro (Whatman GF/A,  $0,45 \mu\text{m}$ ), previamente seco em estufa e pesado. A solução de PTS que passou pelo filtro foi retornada ao tubo de centrifuga juntamente com o “pellet” de solo. Esta suspensão foi levada ao ultra-som até obter a dispersão dos agregados do solo a fim de liberar a FLO (MOS oclusa em agregados e não associada à fração mineral do solo). A recuperação da FLO foi feita por centrifugação e filtragem da mesma forma que a FLL. Ambos os filtros contendo a fração FLL e FLO foram lavados por três vezes sob o aparato filtrador, com 200 mL de água destilada, 50 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  (0,01 molar) para remover o PTS, e 200 mL de água destilada para remover o  $\text{CaCl}_2$  das frações. Em seguida os filtros foram secos em estufa à  $50^\circ\text{C}$  por 24 horas, pesados, moídos e quantificados quanto ao teor de carbono via combustão seca.

A fração pesada, que ficou no fundo do tubo de centrifuga após a filtragem do sobrenadante contendo a FLO, foi transferida para tubos de centrifuga de 250 mL e submetida a três lavagens com 200 mL de água destilada, homogeneização e centrifugação. O sobrenadante de cada lavagem foi armazenada para recuperação do PTS, e a fração sólida foi descartada ao final das lavagens. Desta forma, a massa e o estoque de C da FP foram obtidos pela diferença entre o solo inteiro e o total de fração leve (FLL e FLO).

Devido à dificuldade de se obter exatamente a mesma quantidade de fração leve (FL) para repetições da mesma amostra, foi utilizada uma correção para uma base comum, para que fosse possível a comparação das

quantidades obtidas em cada fração para cada granulometria de amostra. O total de FL da amostra < 9,51 mm foi utilizado como base para correção dos valores de C-FLL e C-FLO das amostras < 2,0 mm. Para isso, calculou-se primeiramente as percentagens de cada fração na amostra < 2 mm (equações 1 e 2):

$$\% C-FLL_{2,00\text{ mm}} = (FLL \times 100)/FL \quad (1)$$

$$\% C-FLO_{2,00\text{ mm}} = (FLO \times 100)/FL \quad (2)$$

Com as proporções de cada fração e o total de FL na amostra de 9,51 mm, ajustou-se o valor de FLL e FLO da amostra de 2,00 mm.

$$C-FLL_{2,00\text{ mm}} = FL_{9,51\text{ mm}} \times (\% C-FLL_{2,00\text{ mm}}/100) \quad (3)$$

$$C-FLO_{2,00\text{ mm}} = FL_{9,51\text{ mm}} \times (\% C-FLO_{2,00\text{ mm}}/100) \quad (4)$$

Na comparação de diferentes sistemas de manejo quanto a magnitude da proteção física da MOS é importante verificar quanto do aumento de FLO que ocorreu com a mudança no sistema de manejo representa no aumento do estoque de C do solo (Conceição, 2006). Desta forma, para verificar como a granulometria da amostra afeta esta comparação entre sistemas de manejo, calculou-se quanto a FLO representou no aumento do estoque de C do solo devido à melhoria no sistema de manejo em cada granulometria de amostra, pela razão entre a variação de C-FLO ( $\Delta C-FLO$ ) e a variação total no solo ( $\Delta COT$ ). Esta variação é calculada pela diferença entre o sistema com maior e o com menor aporte de C ao solo. Um exemplo para o solo PV-ES é apresentado na equação 5:

$$\Delta C-FLO / \Delta COT_{(PV-ES)} = (C-FLO_{PD} - C-FLO_{PC}) / (COT_{PD} - COT_{PC}) \quad (5)$$

A análise estatística foi realizada comparando-se separadamente o efeito da granulometria da amostra em cada experimento de campo, com análise de variância e testes de médias utilizando Tukey a 10 % de probabilidade.

## 5.5 Resultados e discussão

As comparações entre as duas granulometrias de amostras para o fracionamento físico densimétrico, foram discutidas com referência aos dados obtidos a partir da amostra com agregados < 9,51 mm.

### 5.5.1 Variação na concentração de C das frações, e a relação com atributos do solo

O teor de C na FLL e FLO variou entre os dois tipos de amostra (Tabela 4). A amostra < 2,00 mm apresentou enriquecimento de C em ambas frações comparado a amostra < 9,51 mm. Este efeito foi mais evidente na FLL, demonstrando que a quebra dos agregados grandes no preparo da amostra < 2,00 mm liberou parte da FLO (mais rica em C que a FLL) que foi recuperada como FLL, aumentando assim a concentração de C nesta fração. Na FLO o enriquecimento de C pode estar relacionado a uma perda seletiva de FLO, menos concentrada em C, com a quebra dos agregados durante o preparo da amostra. Neste processo, a MOS com menor tempo de residência no solo, protegida entre os agregados de 2,00 a 9,51 mm, talvez seja preferencialmente liberada com a quebra dos agregados no preparo da amostra < 2,00 mm. Por sua vez, os agregados menores, que contém FLO mais rica em C (Skjemstad et al., 1996), contribuiriam para o enriquecimento de C da FLO.

Tabela 4. Concentração de carbono da fração leve livre (FLL) e da fração leve oclusa (FLO), utilizando o fracionamento físico densimétrico com amostras menores que 9,51 e 2,00 mm

Solo-local	Sistema de manejo	FLL		FLO	
		9,51 mm	2,00 mm	9,51 mm	2,00 mm
----- g kg <sup>-1</sup> C na fração -----					
PV-ES	PC <sup>1</sup>	11,90 a	13,89 a	24,89 a	26,10 a
	PD <sup>1</sup>	16,14 a	17,73 a	26,81 a	26,96 a
LV-CG	PC <sup>1</sup>	21,78 b	24,59 a	32,85 a	34,05 a
	PP <sup>2</sup>	14,11 b	16,28 a	27,58 b	32,61 a
LV-D	PD <sup>2</sup>	15,37 b	19,35 a	29,47 b	31,67 a
	PP <sup>2</sup>	18,09 b	20,55 a	29,06 b	31,31 a
LV-M	PD <sup>2</sup>	14,47 a	16,30 a	28,24 b	30,76 a
	PP <sup>2</sup>	17,13 a	17,20 a	29,75 a	30,39 a
LV-CR	PC <sup>3</sup>	19,91 a	20,39 a	35,15 a	35,60 a
	PD <sup>3</sup>	16,37 a	17,23 a	28,74 a	30,07 a
<b>Média geral</b>		<b>16,53</b>	<b>18,35</b>	<b>29,25</b>	<b>30,95</b>

PV-ES - Argissolo Vermelho em Eldorado do Sul-RS; LV – Latossolo Vermelho em Campo Grande-MS (CG), Dourados-MS (D), Maracajú-MS (M) e Costa Rica-MS (CR); PC – preparo convencional; PD – plantio direto e PP – pastagem permanente.

<sup>1</sup> Fracionamento físico com amostras < 9,51mm realizado por Conceição (2006) para PV – ES, Conceição (informação pessoal) para LV – CG em PC; <sup>2</sup> Fracionamento físico com amostras < 9,51mm realizado por Boeni (2007); <sup>3</sup> Fracionamento físico com amostras < 9,51mm realizado no estudo III desta tese.

Valores seguidos de mesma letra, na linha, para a mesma fração e tratamento de campo, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Quanto à recuperação de C da FLO (C-FLO), a utilização de amostras < 2 mm para o fracionamento físico, subestimou a quantidade de C-FLO da MOS, e conseqüentemente aumentou a quantidade de C-FLL (Tabela 5). Para todos os sistemas de manejo avaliados, os valores de C-FLO foram menores para amostra < 2 mm, diferindo significativamente nos sistemas LV-CG e no LV-D, ambos sob PP. A variação na subestimação de C-FLO, em relação ao C-FL ( $\Delta C-FLO/C-FL$ ), representou de 2,1% a 15,7%. Em valores absolutos subestimação nas amostras < 2 mm foi de 0,04 a 1,43 g kg<sup>-1</sup> ( $\bar{x} = 0,71$ ), comparado às quantidades de C-FLO obtida em amostras < 9,51 mm (

Tabela 6). Estes valores apresentaram correlação significativa com a concentração de COT, massa de agregados > 2,0 mm e o IEA. Desta forma, em um mesmo experimento de campo, os sistemas de manejo com maior aporte de C seriam mais afetados pela subestimação da FLO.

Tabela 5. Carbono da fração leve livre (C-FLL) da fração leve oclusa (C-FLO), e da soma das duas (C-FL), utilizando o fracionamento físico densimétrico com amostras menores que 9,51 e 2,00 mm

Solo-local	Sistema de manejo	C-FLL		C-FLO		C-FL <sup>4</sup>	$\Delta$ C-FLO
		9,51 mm	2,00 mm	9,51 mm	2,00 mm	C-FL	C-FL
----- g C kg <sup>-1</sup> solo -----							
PV-ES	PC <sup>1</sup>	0,62 aB	0,65 aB	1,31 aB	1,27 aB	1,92	2,08
	PD <sup>1</sup>	2,41 aA	3,04 aA	4,62 aA	3,98 aA	7,03	8,99
LV-CG	PC <sup>1</sup>	1,87 aB	2,57 aB	2,98 aB	2,29 aB	4,86	14,3
	PP <sup>2</sup>	2,15 bA	3,50 aA	6,50 aA	5,14 bA	8,64	15,7
LV-D	PD <sup>2</sup>	1,15 aB	1,51 aB	3,89 aB	3,54 aA	5,04	6,99
	PP <sup>2</sup>	2,52 aA	3,80 aA	7,53 aA	6,24 bA	10,04	12,79
LV-M	PD <sup>2</sup>	0,94 aB	1,24 aB	4,14 aB	3,84 aA	5,08	5,85
	PP <sup>2</sup>	1,88 bA	3,31 aA	7,45 aA	6,02 aA	9,34	15,31
LV-CR	PC <sup>3</sup>	1,65 aB	1,95 aB	5,17 aB	4,87 aB	5,74	3,04
	PD <sup>3</sup>	5,07 aA	5,84 aA	8,61 aA	7,84 aA	9,06	5,67
<b>Média geral</b>		<b>2,03</b>	<b>2,74</b>	<b>5,22</b>	<b>4,50</b>	<b>12,84</b>	<b>9,88</b>

PV-ES - Argissolo Vermelho em Eldorado do Sul-RS; LV – Latossolo Vermelho em Campo Grande-MS (CG), Dourados-MS (D), Maracajú-MS (M) e Costa Rica-MS (CR); PC – preparo convencional; PD – plantio direto e PP – pastagem permanente.

<sup>1</sup> Fracionamento físico com amostras < 9,51 mm realizado por Conceição (2006) para PV – ES, Conceição (informação pessoal) para LV – CG em PC; <sup>2</sup> Fracionamento físico com amostras < 9,51 mm realizado por Boeni (2007); <sup>3</sup> Fracionamento físico com amostras < 9,51 mm realizado no estudo III desta tese; <sup>4</sup> Igual para amostras < 9,51 mm e < 2,00 mm, em função da correção feita para amostras < 2,00 mm com base na massa de carbono da fração leve (C-FL) das amostras 9,51 mm;

$\Delta$  C-FLO/C-FL – a variação na quantidade de fração leve obtida nas duas granulometrias de amostra e a quantidade total de fração leve do solo.

Valores seguidos de mesma letra, na linha, para a mesma fração e mesmo tratamento de campo, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna e mesma área experimental, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Uma exceção quanto à subestimação de C-FLO foi observado no solo LV-CG para o sistema com baixo aporte de C (PC), comparado aos outros sistemas com baixo aporte de C nos demais solos utilizados. A % de subestimação foi semelhante ao sistema com alto aporte (LV-CG PP). Este comportamento provavelmente esteja relacionado o sistema de culturas utilizado e teor de argila. O sistema PC era cultivado com soja, somente no verão, tendo assim um baixo aporte de resíduos principalmente via sistema radicular que é o principal responsável pela formação de macroagregados (Silva e Mielniczuk, 1997; Salton et al., 2008). No entanto, se este solo apresenta apenas 12% da massa de agregados maior que 2 mm (

Tabela 6), o que levaria a ter uma alta subestimação de FLO com a moagem amostra para preparo da amostra < 2,00 mm? Provavelmente, devido a ausência de gramínea no sistema PC, quando o solo foi submetido à moagem para passar em peneira de 2,00 mm, poderia ocorrer um maior rompimento da sua estrutura, “pulverizando” o solo, enquanto que em solos com gramíneas, o entrelaçamento dos agregados pelas raízes (Silva & Mieniczuk, 1997) poderia ajudar a mantê-los unidos em estruturas menores sem a total desfragmentação.

A redução do revolvimento do solo e a presença de gramíneas está relacionada à melhoria na agregação do solo (Silva & Mielniczuk., 1997; Conceição et al, 2005; Salton, 2008), a qual está diretamente relacionada com a proteção física da MOS (Golchin et al., 1994b, 1997; Conceição, 2006). Portanto, se o solo apresenta elevada massa de agregados > 2 mm e com alto IEA, na fase de separação da FLL que envolve apenas uma leve agitação na solução de PTS, estes se mantêm inteiros e a FLO no seu interior irá ser liberada apenas após dispersão com ultrason. No entanto, quando se prepara uma amostra em peneira de malha 2,00 mm os agregados maiores que esta malha são quebrados com a moagem, e parte da FLO do interior dos agregados > 2 mm é liberada e recuperada na fase de separação da FLL. Desta forma, quanto maior a quantidade de FLO protegida em agregados > 2,00 mm resistentes em água, maior será o efeito do preparo inicial da amostra.

Tabela 6. Subestimação da fração leve oclusa (FLO) e atributos do solo relacionados: carbono orgânico total do solo (COT), proporção de agregados entre 9,51 e 2,00 mm estáveis em água, índice de estabilidade de agregados (IEA)

Solo-local	Sistema de manejo	Subestimação da FLO <sup>2</sup>	COT	Agregados > 2,0 mm <sup>1</sup>	IEA <sup>1</sup>
		----- g kg <sup>-1</sup> solo -----		-- % --	
PV – ES	PC <sup>1</sup>	0,04 a	9,1	29	63
	PD <sup>1</sup>	0,63 b	18,9	59	95
LV – CG	PC <sup>1</sup>	0,69 a	16,5	12	60
	PP <sup>2</sup>	1,36 b	27,8	55	100
LV – D	PD <sup>2</sup>	0,35 a	18,2	39	71
	PP <sup>2</sup>	1,28 b	30,5	62	91
LV – M	PD <sup>2</sup>	0,30 a	22,4	34	76
	PP <sup>2</sup>	1,43 b	35,7	72	100
LV- CR	PC	0,21 a	27,3	30	63
	PD	0,78 b	40,3	40	74
<b>Média</b>		<b>0,71</b>	<b>24,7</b>	<b>43</b>	<b>79</b>
Coeficiente de regressão			<b>0,85*</b>	<b>0,81*</b>	<b>0,89*</b>

PV-ES - Argissolo Vermelho em Eldorado do Sul-RS; LV – Latossolo Vermelho em Campo Grande-MS (CG), Dourados-MS (D), Maracajú-MS (M) e Costa Rica-MS (CR); PC – preparo convencional; PD – plantio direto e PP – pastagem permanente.

<sup>1</sup> Dados das amostras < 9,51 mm obtidos por Conceição (2006) para PV – ES, Salton (2005) para LV-CG e Boeni (2007) para os demais solos; <sup>2</sup> Subestimação da FLO em amostras < 2,00 mm dada pela diferença entre C-FLO<sub>9,51 mm</sub> – C-FLO<sub>2,00 mm</sub>.

\* Coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>) entre atributos do solo e a subestimação da FLO em amostras < 2,00 mm, significativo a 5 % de probabilidade pelo Teste t.

### 5.5.2 Influência da subestimação de FLO em amostras 2,00 mm para avaliação de sistemas de manejo

Como verificado na

Tabela 6, a magnitude da subestimação não foi similar entre os sistemas de manejo de um mesmo experimento ou mesmo tipo de solo, pois varia em função da agregação, a qual é influenciada pelo sistema de manejo. Em geral, ocorreu uma maior subestimação da FLO nos sistemas com maior aporte de C, o que poderia mascarar os efeitos dos sistemas de manejo. Este aspecto é fundamental, por exemplo, quando se avalia diferentes sistemas de manejo do solo quanto à sua eficiência na proteção física da MOS, onde a FLO é a fração de principal interesse. Na Figura 4 observa-se a variação de C-FLO

entre os dois sistemas de manejo em cada solo ( $\Delta$  C-FLO), quando utilizado amostras de  $< 2,00$  mm e  $< 9,51$  mm.

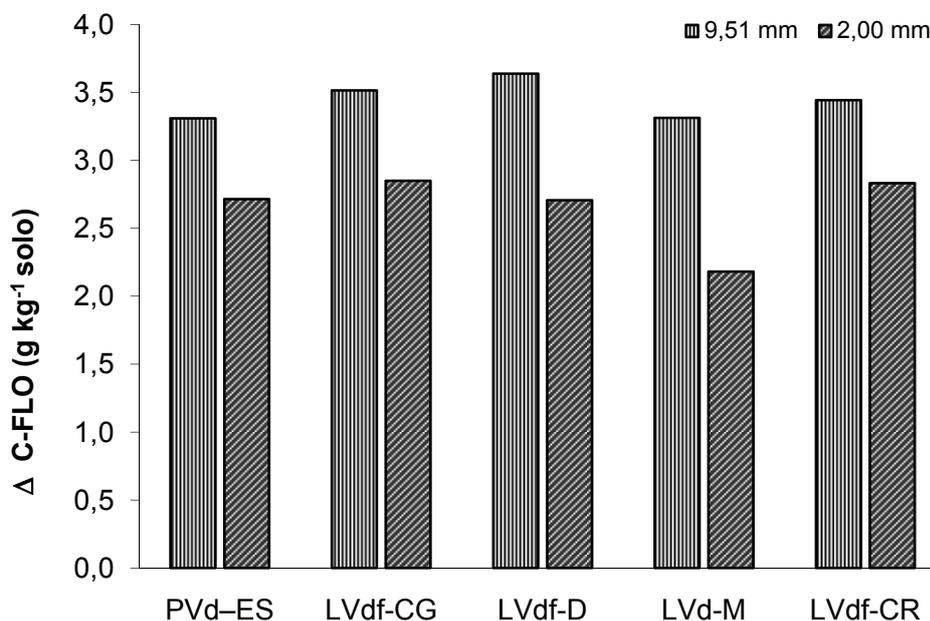


Figura 4. Variação no estoque de C da fração leve oclusa ( $\Delta$  C-FLO), obtida pela diferença entre o sistema de manejo com maior aporte de carbono ao solo e o com menor aporte, para cada solo avaliado, utilizando C-FLO obtida em fracionamento físico com amostras de 9,51 e 2,00 mm.

Em todos os solos avaliados a variação de C-FLO entre o sistema de manejo com maior aporte e menor aporte de C diminuiu, passando de 3,31 a 3,64 g kg<sup>-1</sup> em amostras  $< 9,51$  mm para 2,18 a 2,97 g kg<sup>-1</sup> em amostras  $< 2,00$  mm (Tabela 5). Desta forma, quando utilizou-se amostras  $< 9,51$  mm foi possível observar diferenças significativas entre os dois sistemas de manejo em cada solo avaliado, no entanto, quando utilizou-se amostras  $< 2,00$  mm, estas diferenças deixaram de existir nos solos LV-D e LV-M (Tabela 5). Neste trabalho optou-se por utilizar os tratamentos extremos em aporte de C e agregação em cada experimento de campo, e talvez por isso, ainda foi possível observar diferenças significativas em C-FLO com amostras  $< 2$  mm, para os demais tratamentos. No entanto, quando se trata de sistemas de manejo com menores diferenças entre si, a utilização de amostras de TFSA poderia mascarar os resultados.

O percentual de participação da FLO no C da fração leve e do solo inteiro, também foi afetado, reduzindo em todos os sistemas de manejo com

uso de amostras < 2,00 mm (Figura 5). Em amostras < 9,51 mm o C-FLO representou de 63 a 82% do C da fração leve, enquanto que utilizando amostras < 2,00 mm este percentual reduziu para 47 a 76%, principalmente nos solos com maior estoque de C (Figura 5A). No LV-CG em PC, a quantidade de C obtido da FLO foi menor que da FLL para amostras de TFSA (Tabela 5). Este comportamento não é esperado pois a FLL está mais sujeita à decomposição do que a FLO, a qual além da sua recalcitrância conta com a proteção física no interior de agregados, e por isso poderia permanecer no solo por mais tempo (Golchin et al., 1994b; Conceição, 2006).

A obtenção de quantidades de C da FLL maiores que da FLO tem sido relatado para solos tropicais em alguns trabalhos (Roscoe et al., 2001; Freixo et al., 2002a, b), porém pode estar relacionado a ineficiência do produto (iodeto de sódio) utilizado para solução densa em recuperar a FLO, como demonstrado por Conceição et al. (2007). Além disso, outro fator que pode ter contribuído para este resultado é a granulometria da amostra utilizada (2,00 mm). Portanto, em complemento a recomendação da utilização de PTS para melhoria da obtenção de FLO no fracionamento físico densimétrico (Conceição et al., 2007), é importante a utilização de amostras com maior granulometria que 2,00 mm, como 9,51 mm por exemplo, procurando preservar a FLO no preparo da amostra, para que análise seja o mais próximo possível da condição de campo.

Para o C total do solo a redução no percentual de participação da FLO foi mais pronunciada que na FL (Figura 5B). Em amostras < 2,00 mm a participação da FLO no C total do solo foi praticamente a metade da obtida em amostras < 9,51 mm. Além disso, na comparação dos sistemas de manejo PC e PP no LV-CG utilizando amostras < 2,00 mm, o sistema PC que apresenta menor aporte de C, massa de agregados > 2,00 mm e IEA do que o sistema PP, apresentou uma relação C-FLO/COT maior do que este último, ou seja, no sistema PC a participação da FLO no aumento do COT seria maior que no sistema PP. Este resultado seria contraditório a teoria, visto que em um sistema com menor revolvimento do solo, maior aporte de C e a agregação, é esperado uma maior contribuição da FLO no aumento do COT do solo, como verificado em outros trabalhos (Boeni et al., 2007; Conceição et al., 2008).

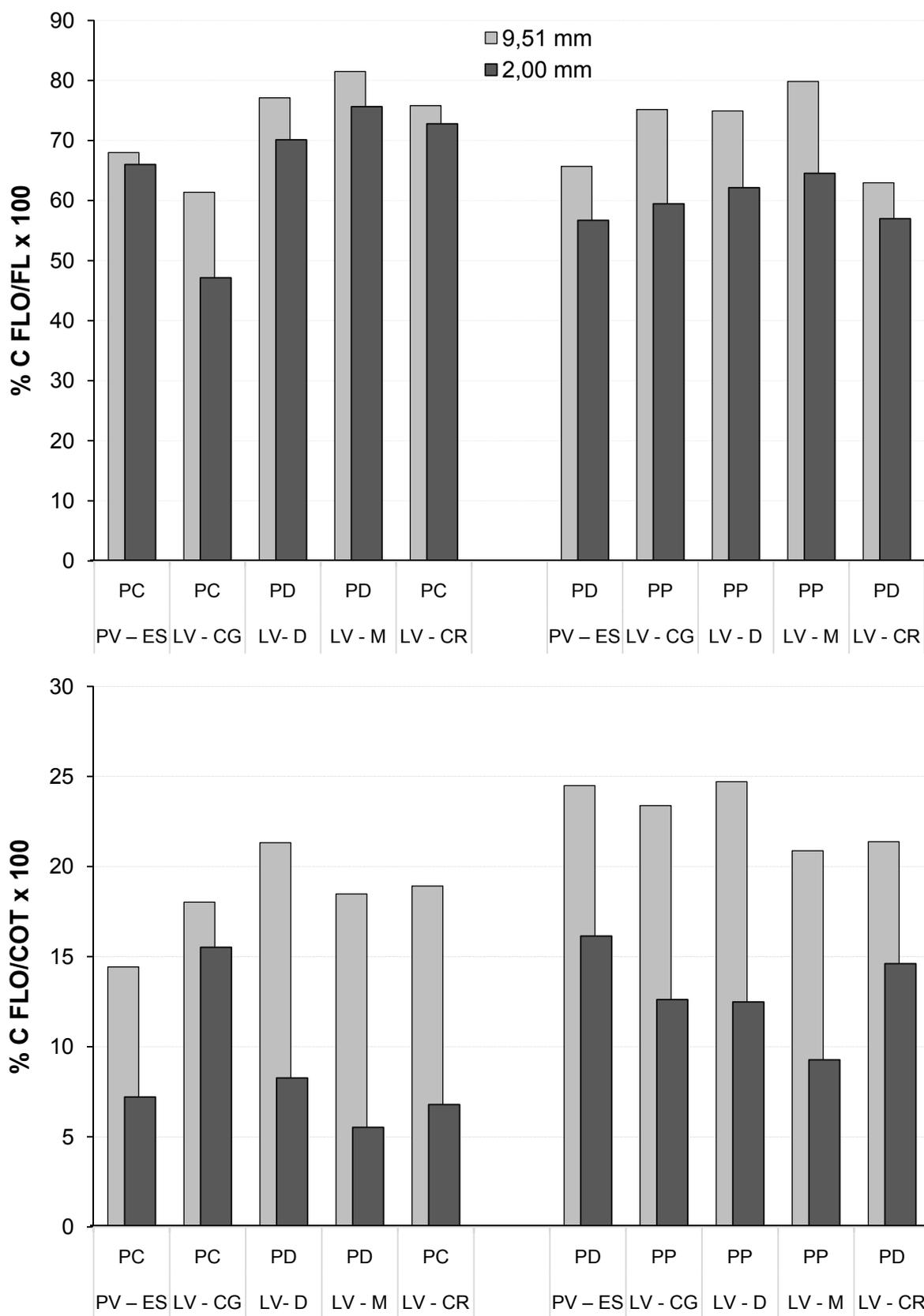


Figura 5. Proporção de C-FLO na fração leve (A) no carbono total do solo (B), em fracionamento físico com amostras de 9,51 e 2,00 mm.

Ainda na avaliação da qualidade de sistemas de uso e manejo do solo, além da participação da FLO no COT do solo, é importante conhecer quanto do aumento do COT, quando da mudança do sistema de manejo, é devido ao aumento de FLO. Isto permite inferir sobre a eficiência do sistema de manejo na proteção física da MOS (Conceição, 2006), que pode ser considerado um importante mecanismo de estabilização da MOS e acúmulo de C em solos tropicais. Para obter esta informação, considera-se o sistema com baixo aporte de C como referência e calcula-se quanto do aumento de COT ( $\Delta$  COT) nos sistemas de manejo com alto aporte foi devido ao acúmulo de C na FLO ( $\Delta$  C-FLO), obtendo-se a relação ( $\Delta$  C-FLO/ $\Delta$ COT) em cada granulometria de amostra utilizada.

Em todos os solos, a participação da FLO no acúmulo de C no solo diminuiu com o fracionamento físico a partir de amostra  $< 2,00$  mm, devido à menor recuperação da FLO neste tamanho de amostra (Figura 6 Tabela 5). O efeito foi maior nos dois solos que combinam maior teor de argila e pastagem permanente do sistema com maior aporte de C (LV-D e LV-M). Nestes solos, ambos os sistemas de manejo têm mínimo revolvimento do solo o que beneficia a formação de agregados  $> 2,0$  mm, sendo assim, a FLO neste tamanho de agregado é de maior importância na diferenciação entre os sistemas de manejo.

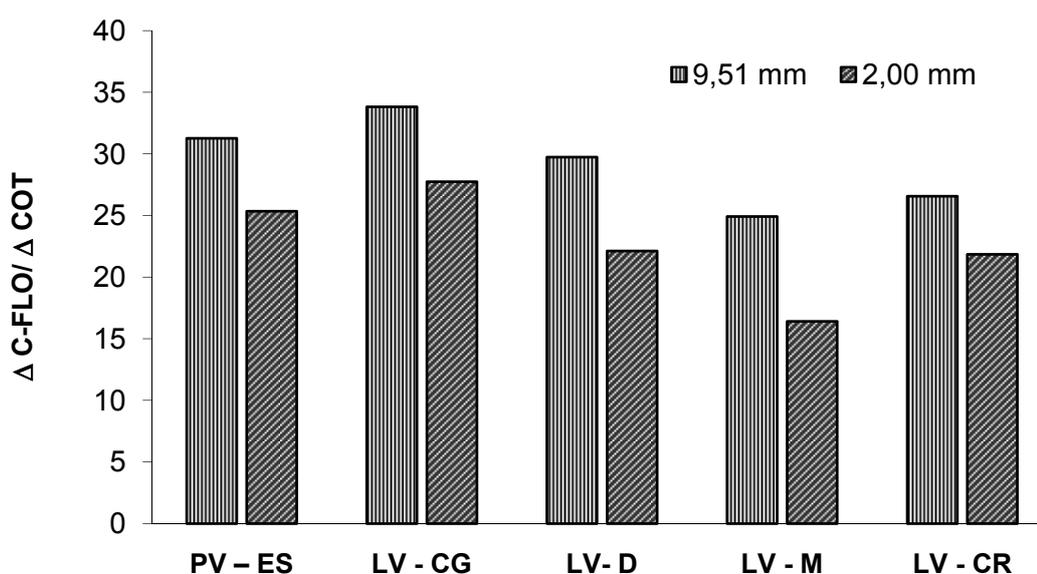


Figura 6. Relação entre a variação de carbono da fração leve oclusa e do carbono do solo ( $\Delta$ C-FLO/ $\Delta$ COT). O  $\Delta$  é obtido pela diferença entre o sistema de manejo com maior aporte de carbono ao solo e o sistema com menor aporte, para cada solo avaliado, em amostras  $< 9,51$  e  $< 2,00$  mm.

## 5.6 Conclusões

A granulometria da amostra de solo utilizada no fracionamento físico influenciou a quantidade de C-FLO obtido no fracionamento físico densimétrico. Em todos os solos a recuperação de FLO foi menor em amostras < 2,00 mm.

A subestimação de FLO foi maior em sistemas de manejo com alto aporte de C, maiores percentagem de agregados > 2,00 mm e alto IEA.

A avaliação de diferentes sistemas de manejo quanto a proteção física da MOS pode ser prejudicada, principalmente em solos com elevado teor de argila, onde as diferenças são menores e podem não ser detectadas se utilizado amostras < 2,00 mm.

## **6. ESTUDO II: ESTOQUE E LABILIDADE DO CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO EM LATOSSOLOS DO CERRADO**

### **6.1 Introdução**

Na agricultura e pecuária, a intensa exploração dos solos com manejo inadequado tem levado a degradação de extensas áreas, especialmente sob climas tropicais e subtropicais, comprometendo a qualidade dos solos e a sustentabilidade da produção agrícola e do ambiente. A região do Cerrado que ocupa aproximadamente 23% do território nacional, sob clima tropical e predomínio de Latossolos (46% da região), passou por uma rápida ocupação dos solos com lavouras ou pastagens extensivas a partir da década de 70. Vários fatores contribuíram para esta expansão, como a necessidade de ampliação da fronteira agrícola, avanços de tecnologia em fertilidade do solo e o melhoramento genético de plantas mais adaptadas a região. Além disso, o relevo plano e as propriedades físicas do solo são muito favoráveis a agricultura mecanizada em grande escala.

No entanto, o desenvolvimento de sistemas de manejo eficazes na manutenção da qualidade do solo nesta região não acompanhou o avanço da agricultura e pecuária, o que levanta importantes questões sobre a sustentabilidade dos agroecossistemas nesta região (Resende et al., 1996). O intenso revolvimento do solo para o preparo das áreas causa degradação na qualidade dos solos, com reduções no estoque de C, principalmente pelas perdas da fração lábil (Bayer et al., 2004). Silva et al. (1994) verificaram intensas reduções dos estoques de C na conversão de áreas nativas em agricultura com intensivo revolvimento do solo. Entretanto, outros autores

afirmam que estas perdas são menores que em regiões temperadas (Zinn et al., 2005; Bayer et al., 2006). Dados da literatura demonstram que a conversão de preparo convencional (PC) para sistemas com menor revolvimento, como o plantio direto (PD), podem recuperar os estoques de C quando comparado a solos em PC (Corazza et al., 1999; Bayer et al., 2006), principalmente na fração lábil (Leite et al., 2004; Bayer et al., 2004). No entanto, Roscoe & Buurman (2003), não encontraram diferenças significativas entre PC e PD em Latossolos cultivados com sucessão milho/soja em Sete Lagoas-MG em 10 anos de experimento. Desta forma, conclusões sobre o efeito dos sistemas de preparo do solo no estoque de C são ainda contrastantes, e poucos avaliaram o efeito sobre a fração lábil da MOS.

Como a manutenção da qualidade do solo é essencial para a capacidade produtiva dos sistemas de agrícolas, e depende de um alto fluxo de energia e matéria no sistema solo (Bayer et al., 2006b; Mielniczuk et al., 2003), cresce a busca de sistemas de manejo com altos aportes de resíduos e que propicie condições favoráveis para a manutenção destes no solo, principalmente em superfície. Em sistemas agrícolas na região do Cerrado, a taxa de decomposição da MOS do solo é acelerada pelas elevadas temperaturas durante a maior parte do ano, além disso, as chuvas são concentradas e ocorrem com eventos chuvosos de altas intensidades, sendo assim, é um desafio adaptar sistemas de manejo com menores perdas de MOS e alta taxa de adição de resíduos vegetais.

Neste sentido, alguns índices têm sido utilizados para avaliar a capacidade do sistema de manejo em promover a qualidade do solo e a sustentabilidade do agroecossistema. Dentre os vários índices propostos, Blair et al. (1995) sugeriram um Índice de Manejo de Carbono (IMC), capaz de sintetizar aspectos qualitativos (labilidade) e quantitativos (estoque de carbono) da MOS, comparados a uma condição de referência, geralmente uma área de vegetação nativa, para a qual se considera o IMC = 100. No entanto, como a quantificação da fração lábil da MOS por oxidação proposto por Blair et al. (1995) é bastante trabalhosa, outros autores tem utilizado alternativamente na determinação da labilidade do C as frações lábeis da MOS obtidas pelo fracionamento físico granulométrico (fração particulada, > 53  $\mu\text{m}$ ) (Dieckow et

al., 2005; Salton, 2006; Vieira et al., 2007), ou densimétrico (fração leve,  $< 1,8$  a  $2,0 \text{ cm}^{-3}$ ) (Vieira et al., 2007).

Portanto, estudos envolvendo solos de diferentes texturas, na região do Cerrado, sob diferentes sistemas de manejo, são necessários para o melhor entendimento dos processos envolvidos na dinâmica MOS e manutenção da qualidade dos solos nesta região.

## **6.2 Hipóteses**

Em solos da região do Cerrado cultivados com a rotação soja, milho e algodão, o sistema plantio direto proporciona melhoria da qualidade do solo, dado pelo aumento no estoque e labilidade da MOS, evidenciados por um maior índice de manejo de carbono.

A resistência dos solos aos impactos dos sistemas de manejo é mais dependente da mineralogia da fração argila do que da textura.

## **6.3 Objetivos**

Avaliar o efeito dos sistemas de preparo do solo na manutenção dos estoques de C do solo inteiro e das frações leve e pesada da MOS.

Inferir sobre a qualidade dos sistemas de preparo convencional e plantio direto através do índice de manejo de carbono.

Avaliar a eficiência do sistema de plantio direto na recuperação da qualidade do solo em sistemas agrícolas da região do Cerrado.

## **6.4 Material e métodos**

Este estudo foi realizado em três experimentos de longa duração conduzidos em Latossolos na região do Cerrado, localizados em fazendas agrícolas pertencentes ao grupo SLC agrícola, com diferentes tempos de condução em Tasso Fragoso-MA (5 anos), Costa Rica-MS (11 anos) e Luziânia-GO (13 anos). A descrição dos experimentos é apresentada no item 4 (material e métodos gerais).

#### 6.4.1 Amostragem do solo

A amostragem foi realizada em abril de 2005, nos sistemas de preparo PC e PD, logo após a colheita da safra 04/05. O solo foi coletado nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, utilizando-se uma pá de corte e espátula. Em cada parcela abriu-se cinco trincheiras de 20 cm de profundidade, e coletou-se uma fatia de solo na largura do espaçamento de plantio, incluindo toda a faixa da linha de plantio (meio de uma entre-linha até o meio da outra entre-linha), que foram homogeneizadas para formar uma amostra representativa da parcela. O solo foi seco em estufa a 60°C, depois moído até passar em peneira de 2 mm, e armazenado para as análises.

Na mesma trincheira, na lateral correspondente à entrelinha de plantio (evitando o revolvimento pela haste por ocasião do plantio), coletou-se amostras para densidade do solo com anéis de 4,0 x 4,6 cm, no centro das camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, em uma das trincheiras de cada tratamento. Próximo a cada área experimental, uma área sob vegetação nativa (Cerrado) foi amostrada como referência da condição natural do solo.

#### 6.4.2 Fracionamento físico densimétrico da MOS

A quantificação das frações orgânicas foi realizada nas amostras das três repetições de campo. Obteve-se a Fração Leve Livre (FLL), Fração Leve Oclusa (FLO) e Fração Pesada (FP) da MOS, utilizando-se solução com densidade 2,0 g cm<sup>-3</sup> de politungstato de sódio (PTS) [Na<sub>6</sub>(W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>H<sub>2</sub>).H<sub>2</sub>O] (SOMETU). A metodologia foi descrita detalhadamente por Conceição (2006).

Brevemente, 10 g de solo (moído a 2 mm), foram colocados em tubo de centrifuga de 100 mL contendo 80 mL de solução de PTS, mantendo uma relação de 16:1 em peso. O tubo foi fechado com rolha de borracha e invertido manual e lentamente por 5 vezes, para evitar o rompimento dos agregados e permitir que a FLL (MOS localizada entre os agregados) fosse liberada para flotar na suspensão. A suspensão foi centrifugada a 2000 g por 90 minutos, para decantar a fração mineral e formar um “pellet” no fundo do tubo, possibilitando verter o sobrenadante contendo a FLL (densidade < 2,0 g cm<sup>-3</sup>) em um sistema de filtração a vácuo (Sartorius), sob um filtro de fibra de vidro

(Whatman GF/A, 0,45  $\mu\text{m}$ ), previamente seco em estufa e pesado. A solução de PTS que passou pelo filtro foi retornada ao tubo de centrífuga contendo o pellet de solo, e a suspensão foi submetida à energia de ultra-som visando a dispersão dos agregados do solo e a liberação da FLO (matéria orgânica oclusa em agregados e não associada à fração mineral do solo). A recuperação da FLO foi feita por centrifugação e filtragem da mesma forma que a FLL. Ambos os filtros contendo a FLL e FLO foram lavados sob o sistema de filtração, com 200 mL de água destilada e em seguida 50 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  (0,01 molar) para remover o PTS das frações, e posteriormente 200 mL de água destilada para remover o  $\text{CaCl}_2$ . Após, os filtros foram secos em estufa à 50°C por 24 horas, pesados, moídos em gral de ágata e armazenados para quantificação do teor de carbono.

A fração pesada, que ficou no fundo do tubo de centrífuga após a filtragem do sobrenadante contendo a FLO, foi transferida para tubos de centrífuga de 250 mL e submetida a três lavagens com 200 mL de água destilada, homogeneização e centrifugação. O sobrenadante de cada lavagem foi armazenado para recuperação do PTS, e o solo residual foi descartado. O estoque de C da FP foi obtido pela diferença entre o estoque de C do solo inteiro e das frações leves.

Apesar de realizada a separação da FLL e FLO, optou-se por utilizar na interpretação dos resultados os dados referentes ao total de fração leve ( $\text{FL} = \text{FLL} + \text{FLO}$ ), em função dos resultados obtidos no estudo I (realizado cronologicamente posterior a este estudo, durante os trabalhos da tese), os quais mostraram que amostras moídas a 2,00 mm são impróprias para o fracionamento físico quando se prevê a quantificação da FLO, devido à subestimação da mesma.

A energia necessária para obter 99% da dispersão dos agregados do solo foi determinada em testes preliminares por meio de uma curva de dispersão de argila, em função da energia aplicada ( $\text{J mL}^{-1}$ ), a partir de uma amostra composta da parcela de plantio direto na camada de 0-10 cm, para cada área experimental. As energias necessárias para dispersão do solo foram: 407  $\text{J mL}^{-1}$  para os solos de Tasso Frágoso-MA e Costa Rica-MS e de 1096  $\text{J mL}^{-1}$  para o solo de Luziânia-GO.

O carbono do solo inteiro (moído  $\Phi < 0,25$  mm) e das frações densimétricas da MOS foi determinado por combustão seca em analisador de C modelo Shimadzu-TOC. Os estoques de C do solo e das frações foram calculados e corrigidos para massa equivalente de solo (Ellerty & Bettany, 1995) em cada camada amostrada, tomando-se como referência a massa de solo da área de Cerrado.

#### **6.4.3 Índice de manejo de C e seus subíndices: índice de labilidade e de estoque de C**

A labilidade do carbono (LC) foi calculada para cada camada amostrada, como sendo a relação entre a fração de carbono lábil e a fração de carbono não-lábil, de acordo com equação abaixo:

$$LC = C \text{ lábil} / C \text{ não lábil} \quad \text{onde,}$$

$$C \text{ lábil} = \text{estoque de carbono da fração leve (FLL + FLO);}$$

$$C \text{ não lábil} = \text{estoque de carbono da fração pesada (FP)}$$

O índice de manejo de carbono (IMC) e os seus componentes, índice de estoque de carbono (IEC) e o índice de labilidade do carbono (ILC), foram calculados para a camada de 0-20 cm, considerando como referência o solo sob Cerrado com  $IMC = 100\%$ ,

$$IMC = IEC \times ILC \times 100 \text{ onde,}$$

$$IEC = \text{estoque de C do tratamento} / \text{estoque de C da referência}$$

$$ILC = LC \text{ do tratamento} / LC \text{ da referência}$$

#### **6.4.4 Análise estatística**

No tratamento dos dados foi utilizada a análise de variância vinculada ao teste de aleatorização, conforme método descrito em Pillar & Orlóci (1996) e implementado no software MULTIV (Pillar, 2005).

O teste de aleatorização baseia-se na partição da soma de quadrados total ( $Q_b$ ) em soma de quadrados dentro ( $Q_b^o$ ) e entre os grupos ( $Q_b$ ) (Pillar & Orlóci, 1996). As somas de quadrados são computadas a partir de uma matriz de distâncias euclidianas comparando as unidades amostrais aos pares.

O resultado do teste de aleatorização é uma probabilidade ( $P$ ) de obter ao acaso uma variação entre os grupos (CE, PC e PD) tão grande quanto a que foi observada nos dados. A variação entre os grupos é medida por uma soma de quadrados entre grupos, de forma similar à análise de variância tradicional. A probabilidade ( $Q_b^o \geq Q_b$ ) é gerada por simulação aleatória com os próprios dados, em muitas iterações (neste trabalho utilizou-se 10.000), sob a hipótese nula ( $H_0$ ) de que os grupos não diferem entre si. A hipótese nula é rejeitada se  $P$  for suficientemente baixa ( $P \leq \alpha$ ), indicando diferença significativa entre os grupos. Neste caso foi utilizado um  $\alpha$  de 5% para rejeição da hipótese nula de que os grupos diferem entre si, e no teste de médias foi de 10%, em função do pequeno número de unidades amostrais envolvidas em cada contraste (seis).

Aplicou-se teste de aleatorização, ao invés da análise de variância tradicional baseada no teste F, por este não pressupor variáveis com distribuição normal e homogeneidade de variância, os quais são pré-requisitos básicos para aplicar o teste F na análise de variância tradicional, e nem sempre são obtidos em experimentos à campo. Mais detalhes sobre testes de aleatorização e sua fundamentação podem ser encontrados em Manly (1991).

A análise estatística foi realizada com programa MultivMinorWindons v.2.3.21 (Pillar, 2005), comparando os tratamentos entre si, em cada camada de solo, quanto aos estoques de C do solo inteiro e das frações leve e pesada da MOS.

## **6.5 Resultados e discussão**

A conversão do uso do solo sob vegetação nativa para sistemas agrícolas em PC levou a redução nos estoques de C principalmente da fração lábil (Tabela 7), resultando em um menor IMC (Figura 9), e conseqüente degradação na qualidade do solo (Salton, 2005; Vieira et al., 2007). Por outro lado, a conversão de PC para PD proporcionou uma melhoria da qualidade do solo ao longo de 13 anos no LVA – GO, 11 anos no LV – MS e 5 anos no LVA-MA, comparado ao solo mantido em PC, evidenciado pelo aumento no IMC. Como os experimentos não foram instalados logo após a conversão do CE para agricultura, o solo sob CE não é uma referência das condições do solo no

Tabela 7. Estoques de carbono do solo (COT) e das frações físicas da matéria orgânica do solo (FL-fração leve e FP – fração pesada), em três Latossolos, sob preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e Cerrado (CE), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e no somatório das três camadas amostradas (0-20 cm).

Sistema de uso e manejo	LVA- GO <sup>1</sup>			LV - MS <sup>2</sup>			LVA- MA <sup>3</sup>		
	COT	FL	FP	COT	FL	FP	COT	FL	FP
----- Mg ha <sup>-1</sup> -----									
..... 0 – 5 cm .....									
CE	14,89 b	4,27 b	10,62 a	17,67 a	5,15 a	12,52 a	14,06 a	8,02 a	6,04 a
PC	12,74 c	3,03 c	9,72 a	10,95 b	2,51 c	8,45 c	8,75 c	4,02 c	4,72 b
PD	17,28 a	6,69 a	10,60 a	13,12 a	3,39 b	9,73 b	10,56 b	5,50 b	5,05 b
..... 5 – 10 cm .....									
CE	13,13 a	2,55 b	10,58 a	15,75 a	3,91 a	11,84 a	11,59 a	4,76 a	6,83 a
PC	13,08 a	3,21 a	9,87 a	12,09 b	2,80 b	9,28 b	8,87 b	4,35 a	4,52 b
PD	13,53 a	3,18 a	10,35 a	11,98 b	2,62 b	9,37 b	9,77 b	4,19 a	5,58 ab
..... 10 – 20 cm .....									
CE	23,81 a	3,56 b	20,26 a	26,76 b	4,05 a	21,86 a	7,69 a	4,78 a	2,91 a
PC	25,22 a	4,33 a	20,89 a	22,55 a	4,06 a	18,50 b	8,14 a	4,40 a	3,74 a
PD	23,98 a	3,60 b	20,38 a	23,56 a	4,90 a	19,49 b	7,22 a	4,35 a	2,87 a
..... 0 – 20 cm .....									
CE	51,83 b	10,38 b	41,46 a	60,18 a	13,96 a	46,22 a	33,34 a	17,56 a	15,78 a
PC	51,04 b	10,56 b	40,48 a	45,58 b	9,36 b	36,23 c	25,76 b	12,77 c	12,98 b
PD	54,80 a	13,47 a	41,33 a	48,66 b	10,07 b	38,59 b	27,55 b	14,04 b	13,51 b

<sup>1</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Luziânia-GO, <sup>2</sup> Latossolo Vermelho em Costa Rica –MS, <sup>3</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Tasso Fragoso-MA;

CE – Cerrado, PC – preparo convencional, PD - plantio direto. Médias seguidas de mesma letra, na camada, não diferem significativamente pelo teste de aleatorização a 10% de probabilidade.

início do experimento. Entretanto, podemos utilizá-lo como referência para verificar os efeitos da mudança de uso do solo, de Cerrado para agricultura em PC desde abertura do Cerrado até a atual coleta (2005). Por outro lado, o solo sob PC é a referência na avaliação dos efeitos do PD na recuperação da qualidade do solo, pois este era o sistema de manejo utilizado na implantação do experimento, e por isso reflete as condições do solo caso não houvesse a conversão para PD.

### **6.5.1 Variações no estoque de C do solo e das frações**

Em todas as áreas experimentais verificou-se uma maior variação nos estoques de C do solo e das frações na camada superficial (Tabela 7). Isso se explica em função da deposição de resíduos em superfície no PD, maior atividade da biota do solo e do sistema radicular, bem como maior influência dos fatores ambientais, de forma que a ação dos sistemas de manejo seja mais pronunciada em superfície (Corraza et al., 1999; Franzlubbers, 2002; Mielniczuk et al., 2003; Conceição, 2006).

A conversão de CE para PC levou a reduções nos estoques de C na camada de 0-5 cm no solo em PC, o qual diferiu estatisticamente do CE nos 3 solos avaliados (Tabela 7). As perdas totais de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-5 cm do solo sob PC foram de 2,15 no LVA-GO, em 28 anos, 6,72 no LV-MS, em 31 anos e 5,31  $\text{Mg ha}^{-1}$  no LVA-MA em 15 anos. Entretanto, em função da maior distribuição dos resíduos no perfil do solo em PC, na camada de 0-20 cm a magnitude das perdas nos estoques de C foi menor. Nesta camada, verificou-se no LVA-GO, um estoque de C em PC igual estatisticamente ao CE, enquanto que nos outros dois solos houve reduções significativas no estoque de C em profundidade, atingindo até 20 cm no LV-MS e até 10 cm no LVA-MA. Em valores absolutos, as perdas de C no LV-MS ( $14,60 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foram praticamente o dobro do LVA-MA ( $7,58 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), porém em ambos os solos, as perdas relativas ao C do solo sob vegetação nativa foram aproximadamente 23-24% (Tabela 8).

Por outro lado, com a conversão de PC em PD, houve acúmulo de C nos três solos avaliados, principalmente na camada superficial. O PD diferiu estatisticamente do PC na camada de 0-5 cm e 0-20 cm, porém com maior

magnitude entre tratamentos na camada de 0-5 cm (Tabela 7). Nesta camada, o PD proporcionou aumento no estoque de C de 4,54 Mg ha<sup>-1</sup> (36%) em 13 anos no LVA-GO, 2,17 Mg ha<sup>-1</sup> (20%) em 11 anos no LV-MS e 1,91 Mg ha<sup>-1</sup> (21%) em 5 anos no LVA-MA (Tabela 8), comparado ao solo mantido em PC. A camada de 0-20 cm seguiu a mesma tendência, porém com menor magnitude nos aumentos dos estoques de C.

Tabela 8. Variação no estoque de carbono do solo (COT) e das frações leve (C-FL) e pesada (C-FP) da matéria orgânica, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm, após conversão do CE para agricultura em PC (PC-CE), e de PC para PD (PD-PC). Entre parênteses, a variação do COT em base anual

	Prof. (cm)	$\Delta$ estoque de C, Mg ha <sup>-1</sup>			$\Delta$ estoque de C, %		
		COT	C-FL	C-FP	COT	C-FL	C-FP
----- LVA-GO <sup>1</sup> -----							
<b>PC-CE (28 anos)</b>	0-5	-2,15 (-0,09)	-1,24	-0,90	-14,4	-29,1	-8,5
	0-20	-0,79 (-0,03)	0,19	-0,98	-1,5	1,8	-2,4
<b>PD-PC (13 anos)</b>	0-5	4,54 (0,35)	3,66	0,88	35,6	121,1	9,0
	0-20	3,76 (0,29)	2,91	0,85	7,4	27,5	2,1
----- LV-MS <sup>2</sup> -----							
<b>PC-CE (31 anos)</b>	0-5	-6,72 (-0,22)	-2,64	-4,08	-38,0	-51,3	-32,5
	0-20	-14,60 (-0,49)	-4,60	-10,00	-24,3	-33,0	-21,6
<b>PD-PC (11 anos)</b>	0-5	2,17 (0,20)	0,88	1,29	19,8	35,3	15,2
	0-20	3,08 (0,28)	0,71	2,37	6,7	7,9	6,5
----- LVA-MA <sup>3</sup> -----							
<b>PC-CE (15 anos)</b>	0-5	-5,31 (-0,31)	-4,00	-1,31	-37,8	-49,9	-21,7
	0-20	-7,58 (-0,45)	-4,79	-2,79	-22,7	-27,3	-17,7
<b>PD-PC (5 anos)</b>	0-5	1,81 (0,36)	1,48	0,33	20,7	36,9	7,0
	0-20	1,79 (0,36)	1,27	0,52	7,00	10,0	4,0

CE – cerrado, PC – preparo convencional, PD – plantio direto.

<sup>1</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Luziânia-GO, <sup>2</sup> Latossolo Vermelho em Costa Rica-MS,

<sup>3</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Tasso Frágoso-MA.

No entanto, em base anual os ganhos em estoque de C com adoção do PD, foram praticamente iguais em ambos os solos argilosos, aproximadamente 0,29 Mg ha<sup>-1</sup> ano, e 0,36 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no LVA-MA, com textura média (Tabela 8, entre parênteses). Considerando que a taxa de

acúmulo de C é semelhante entre as áreas experimentais, o tempo para recuperação total dos estoques de C aos níveis iniciais (CE) vai depender do estágio de degradação que este apresenta na instalação do experimento.

Não há dados disponíveis dos estoques de C no início do experimento de manejo nestas áreas, porém, comparando-se os dois solos argilosos em PC quanto aos estoques de C em 2005, o LV – MS apresenta uma condição de degradação mais acentuada que o LVA-GO. Considerando-se que as maiores perdas de C ocorrem nos primeiros anos de cultivo após a retirada da vegetação nativa (Silva et al., 1997; Mello, 2006; Bortolon, 2008), é provável que o experimento no LV-MS tenha iniciado sob um estágio mais avançado de degradação do solo, em função do maior tempo em PC (20 anos) anterior à instalação do experimento, comparado ao LVA-GO (15 anos). Desta forma, o tempo em PD ainda não foi suficiente para recuperação total do COT.

Entretanto, a dinâmica do COT depende da influência do sistema de manejo nas dinâmicas das frações da MOS, e da proporção que cada fração representa do COT, a qual variou principalmente em função do uso e manejo, e da textura do solo. A participação da FL no estoque de COT variou de 15 a 39% nos solos argilosos, com maior contribuição na camada superficial (Figura 7), enquanto que no solo de textura média (LVA-MA), a participação da FL foi maior, variando de 41 a 62%. Em outros trabalhos com solos de textura média, em experimentos de longa duração, a contribuição da FL no estoque de COT não ultrapassou 40%.

Conceição (2006) observou uma proporção de C da FL no estoque de COT de no máximo 37%, em um Argissolo Vermelho do Rio Grande do Sul (220 g kg<sup>-1</sup> de argila), e Boeni (2007), em um Latossolo Vermelho no Mato Grosso do Sul (360 g kg<sup>-1</sup> argila) observou no máximo 40% do C do solo representado pela FL. Em ambos os trabalhos, a maior quantidade de FL total ocorreu em solos com presença de gramíneas, as quais promovem aumentos de FL pela contribuição do sistema radicular abundante e bem distribuído juntamente com a maior proteção física da MOS no interior dos macroagregados (Oades, 1984; Golchin et al., 1994a).

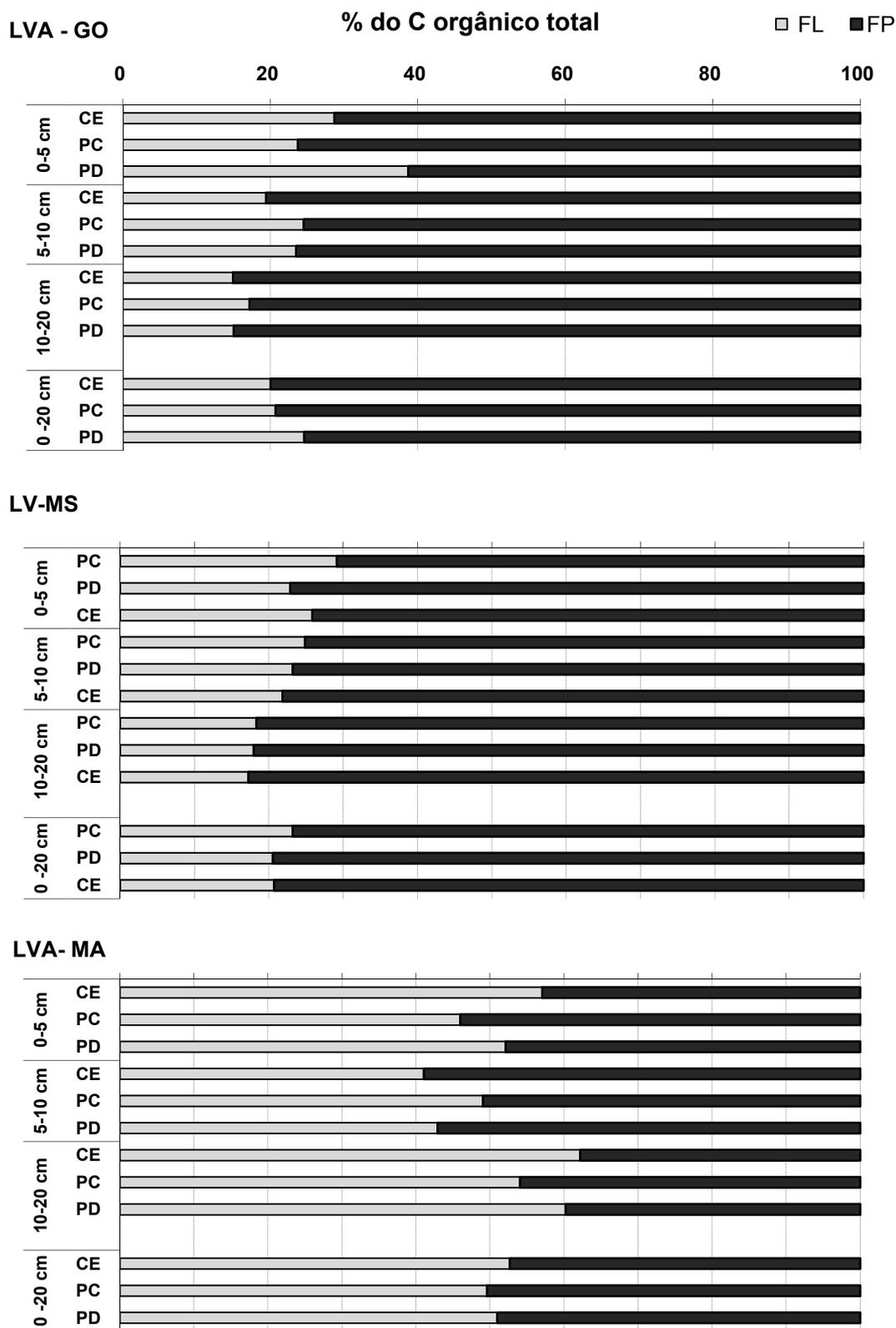


Figura 7. Percentagem do estoque de carbono do solo na fração leve (FL) e fração pesada (FP) da MOS, no LVA-GO (Luziânia), LV-MS (Costa Rica) e LVA-MA (Tasso Fragoso).

Portanto, o padrão de distribuição das frações no LVA-MA foi divergente tanto dos estudos encontrados em literatura como dos demais solos avaliados neste estudo, embora a rotação de culturas seja semelhante nos três solos. Um fator que pode estar relacionado ao comportamento da FL neste solo é a presença de carvão residual proveniente das queimadas espontâneas comuns no bioma Cerrado (Roscoe et al., 2001). Durante o fracionamento físico densimétrico foi possível identificar pedaços de carvão na fração leve visíveis a olho nu tanto nas amostras de solo do CE como das áreas cultivadas, e devido sua baixa densidade específica, o carvão é recuperado na FL (Dieckow et al., 2005; Roscoe & Burmman, 2003; Tomazi, 2004; Brodowski et al., 2006), o que pode ser uma das razões da elevada concentração de C nesta fração, em comparação a FL dos outros dois solos.

Os estoques de C da FL foram afetados pelos sistemas de manejo nas três áreas experimentais, apresentando reduções significativas com utilização do PC, em comparação ao CE, enquanto que a conversão de PC para PD proporcionou recuperação da FL, com valores até superiores ao solo sob vegetação nativa, no LVA-GO, corroborando com resultados obtidos por outros autores (Bayer et al., 2004; Salton, 2005, Conceição, 2006; Boeni, 2007).

Comparado ao solo sob CE, o PC apresentou reduções significativas nos estoques de C da FL nos três locais avaliados, com maior magnitude na camada superficial, na qual há maior concentração de FL e os efeitos do manejo são mais intensos (Tabela 7). O longo período em PC levou a reduções de 29 % ( $1,24 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) nos estoques de C da FL no LVA-GO, de 51% ( $2,64 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) no LV-MS e 50% e no LVA-MA ( $4,00 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), para a camada de 0-5 cm. Enquanto que na camada de 0-20 cm, apenas o LV-MS e LVA-MA apresentaram perdas significativas de C da FL (Tabela 8).

Por outro lado, a conversão para PD levou ao acúmulo de FL na camada superficial nos 0-20 cm dos três solos avaliados. Considerando o solo em PC como referência, o acúmulo devido à conversão para PD foi de 121% no LVA-GO, 35% no LV-MS e 37% no LVA-MA na camada de 0-5 cm, diferindo estatisticamente entre os sistemas de preparo. Na camada de 0-20 cm as variações de C da FL tiveram a mesma tendência da camada superficial, porém com menor magnitude entre os tratamentos (Tabela 7).

A maior dinâmica da FL no solo deve-se a susceptibilidade desta às alterações induzidas pelo manejo, por estar menos protegida no solo do que a

FP, a qual conta com a estabilização pela interação com os minerais do solo, e por isso, geralmente representa a maior reserva de C do solo (Golchin, 1994a; Conceição, 2006; Leite et al., 2004). No LVA-GO a utilização com PC por 25 anos praticamente não afetou os estoques de C da FP e também os estoques totais de C. Da mesma forma, a conversão para PD também não influenciou o estoque de C da FP após 13 anos, porém ocorreram aumentos no COT que se deve principalmente ao aumento no C da FL (Tabela 7). Por outro lado, nos outros dois solos a variação do C da FP foi semelhante ao COT, tanto para perdas em PC como para adições no PD, indicando que estes solos foram mais susceptíveis aos efeitos dos sistemas de manejo, pois afetou inclusive o C da FP que é o mais estável no solo.

O comportamento do LVA-GO quanto às perdas e adições de C na FP deve-se principalmente a contribuição da gibbsita e goethita como agentes agregantes na formação de complexo organo-minerais de alta estabilidade nos Latossolos, resultando em microagregados altamente resistentes a dispersão (Ferreira et al., 1999; Vitorino et al., 2003; Inda Junior, 2005; Tonin et al., 2007). Uma evidência da alta estabilidade de microagregados no LVA – GO foi à elevada energia necessária para dispersão, de  $1096 \text{ J mL}^{-1}$ , enquanto nos demais solos foi de  $407 \text{ J mL}^{-1}$  (Tabela 2, item 4).

Além das variações nos valores absolutos de estoque de C das frações entre os sistemas de manejo, é importante verificar quanto da variação no estoque de C destas frações representou na variação do COT, para inferir sobre a influência dos sistemas de manejo na dinâmica das frações da MOS.

Em todos os solos a maior contribuição da FL no aumento do C do solo foi na camada de 0-5 cm. Nesta camada, a contribuição da FL para o aumento do estoque de COT foi de até 41% no LV e 81% nos LVA (Tabela 9). Entretanto, considerando os mecanismos de estabilização da MOS (recalcitrância, oclusão e interação coloidal) (Golchin et al., 1994a; Sollins, 1996; Six et al., 2002) deveríamos esperar uma maior contribuição da FP no aumento do estoque de COT por esta contemplar os três mecanismos de estabilização (Conceição, 2006). No entanto, nos dois LVA a maior parte do acúmulo de COT foi devido a FL, inclusive na camada de 0-20 cm, onde a contribuição desta fração representou aproximadamente 71% e 77% do aumento do estoque de C no LVA-MA e LVA – GO, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9. Contribuição das frações leve (FL) e pesada (FP) no aumento do estoque de C do solo, com a conversão de preparo convencional para plantio direto, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm, dos três experimentos avaliados.

Solo-Local	Profundidade	$\Delta$ fração		$(\Delta \text{ fração} / \Delta \text{COT}) \times 100$	
		FL	FP	FL	FP
	----- cm -----	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----		----- % -----	
LVA-GO <sup>1</sup>	0-5	3,66	0,88	80,7	19,3
	0-20	2,91	0,85	77,3	22,7
LV-MS <sup>2</sup>	0-5	0,88	1,29	40,8	59,2
	0-20	0,71	2,37	23,1	76,9
LVA-MA <sup>3</sup>	0-5	1,48	0,33	81,8	18,2
	0-20	1,27	0,52	70,9	29,1

<sup>1</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Luziânia-GO; <sup>2</sup> Latossolo Vermelho em Costa Rica-MS; <sup>3</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Tasso Frágoso-MA.

$\Delta$  fração /  $\Delta$ COT\*100,  $\Delta$  obtido pela diferença entre o plantio direto e preparo convencional

A menor contribuição da FP para o aumento do estoque de COT no LVA-GO pode estar relacionada à maior resistência a alterações na FP deste solo às alterações induzidas pelo manejo. Como discutido anteriormente, este solo apresenta alta estabilidade de microagregados, o que pode ser a razão de sua alta resistência, não apresentando perdas significativas de C na FP por 28 anos em PC, enquanto que no LVA-MA, apesar dos elevados teores de goethita, a FP foi mais afetada, porém com menor magnitude comparado ao LV-MS, com predomínio de hematita.

A elevada estabilidade dos microagregados diminui a dinâmica das partículas finas do solo, reduzindo a área disponível para interações da MOS com a matriz mineral (Zotareli et al., 2007). Se os microagregados são bastante estáveis às alterações induzidas pelo manejo do solo, estes poderiam apresentar um comportamento semelhante às partículas de areia e silte, reduzindo assim a área superficial da fração mineral disponível para interações com a MOS. Portanto, reduziria também a capacidade de armazenar C na FP, visto que o acúmulo de MOS na FP é dependente da área disponível para as interações (Hassink, 1997; Roscoe & Burmann, 2003; Dieckow, 2003).

O LV-MS com textura semelhante ao LVA-GO, porém com menores teores de Gb e praticamente ausência de Gt, apresentou maior dinâmica no C da FP, o que provavelmente se deve a maior dispersão e formação de

microagregados, permitindo uma maior dinâmica das partículas finas no processo de dispersão e agregação do solo possibilitando maiores aportes de carbono na FP, bem como as perdas de C em PC.

### **6.5.2 Índice de manejo de carbono e seus sub-índices**

Nos três experimentos avaliados, o solo em PD apresentou um incremento na labilidade do C em relação ao solo em PC, principalmente na camada de 0-5 cm (Figura 8), devido ao maior acúmulo de FL nesta camada, em PD. O aumento do C lábil é um fator chave para manutenção da qualidade do solo, pois esta é a fração mais dinâmica do C do solo (Christensen, 1992), e por isso é uma importante fonte de energia para o sistema solo-planta, retroalimentando os processos químicos, físicos e biológicos e favorecendo as interações entre os componentes do sistema solo, surgindo assim as propriedades emergentes deste sistema. Com a redução no revolvimento do solo, os resíduos permanecem na superfície, o que proporciona um microclima favorável à preservação da MOS (Salton & Mielniczuk, 1995). Este efeito foi maior no LVA – GO, no qual a labilidade do C no solo em PD superou o solo referência.

Na Figura 9 são apresentados os índices de estoque (IEC), de labilidade do C (ILC), e de manejo do C (IMC), sendo que os valores dos dois primeiros foram apresentados no gráfico em porcentagem para melhor adequação visual juntamente com o IMC no mesmo gráfico. O produto entre o IEC e ILC expresso pelo IMC, reflete a qualidade dos sistemas de manejo (Blair et al., 1995; Zanatta, 2006; Vieira, 2007). O IEC expressa a razão entre o estoque de C do solo em cada sistema de manejo com o solo da referência (CE), e o ILC a razão entre a labilidade do C do solo em cada sistema de manejo com o solo referência, ambos para a camada de 0-20 cm. Para todos os sistemas de manejo avaliados o ILC superou o IEC (Figura 9). Isto ocorre devido à maior dinâmica da FL no solo, respondendo mais rapidamente aos efeitos dos sistemas de manejo do que o C total do solo (Christensen, 2001; Vieira et al., 2007).

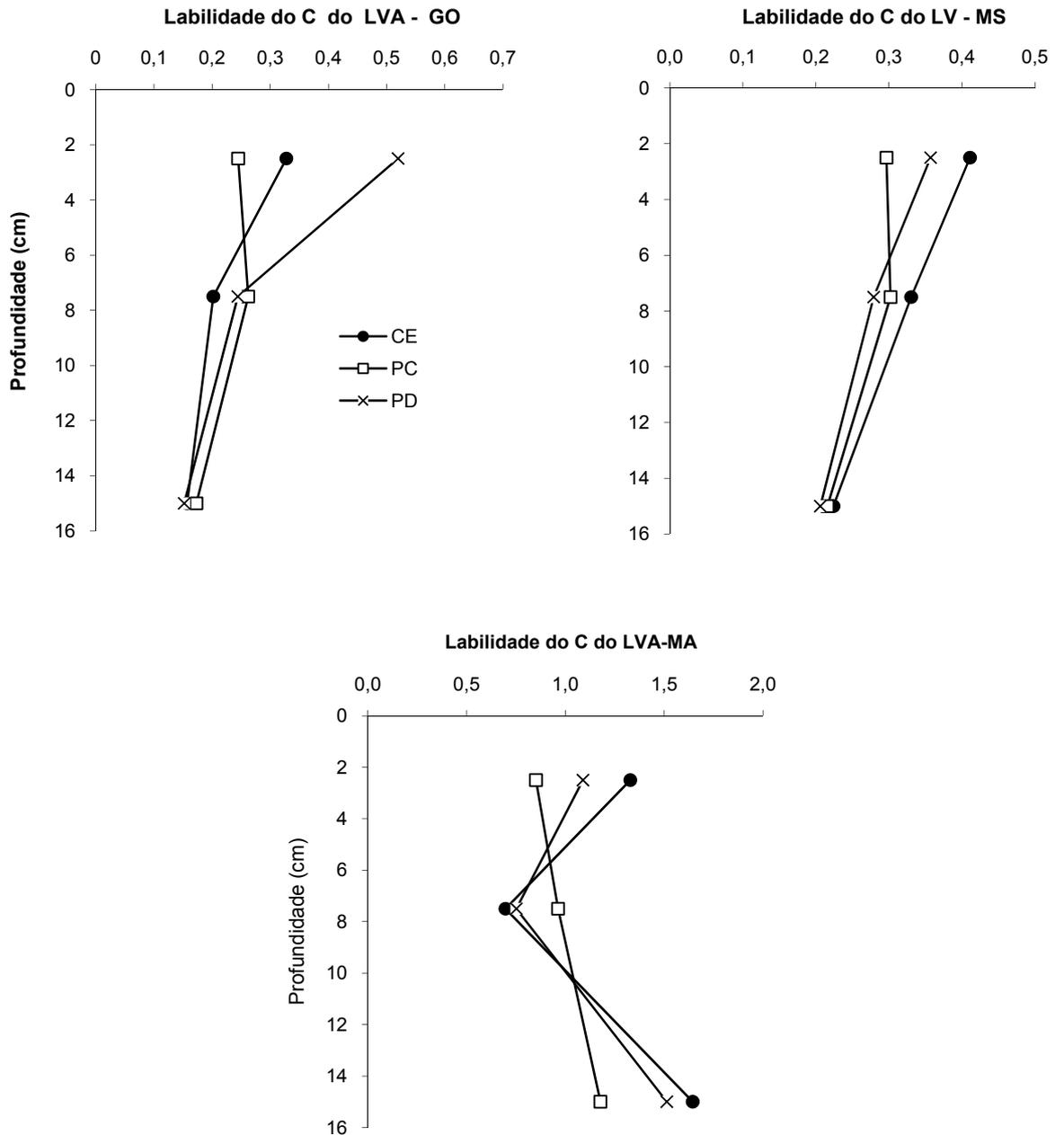


Figura 8. Labilidade do C do solo em preparo convencional (PC), plantio direto (PD) e Cerrado (CE), no LVA-GO em Luziânia, LV-MS em Costa Rica-MS e LVA-MA em Tasso Fragoso, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 0-20 cm.

Os três índices avaliados (IEC, ILC, IMC), foram maiores em PD, demonstrando que este sistema de manejo está sendo eficiente na recuperação da qualidade do solo ao longo do tempo (Figura 9). Além disso, no LVA-GO todos índices do solo em PD superaram o valor da referência (CE=100). O uso do solo em PC praticamente não afetou o estoque e labilidade do C neste solo, indicando uma alta resistência aos impactos do manejo, e como discutido anteriormente, possibilitou a manutenção do estoque

e da labilidade do C na camada de 0-20 cm mesmo após 28 anos em PC (Figura 9a). No entanto, a conversão para PD promoveu um aumento em todos os índices, após 13 anos, resultando em um IMC superior ao Cerrado em 38%, influenciado principalmente pelo ILC que aumentou 30%.

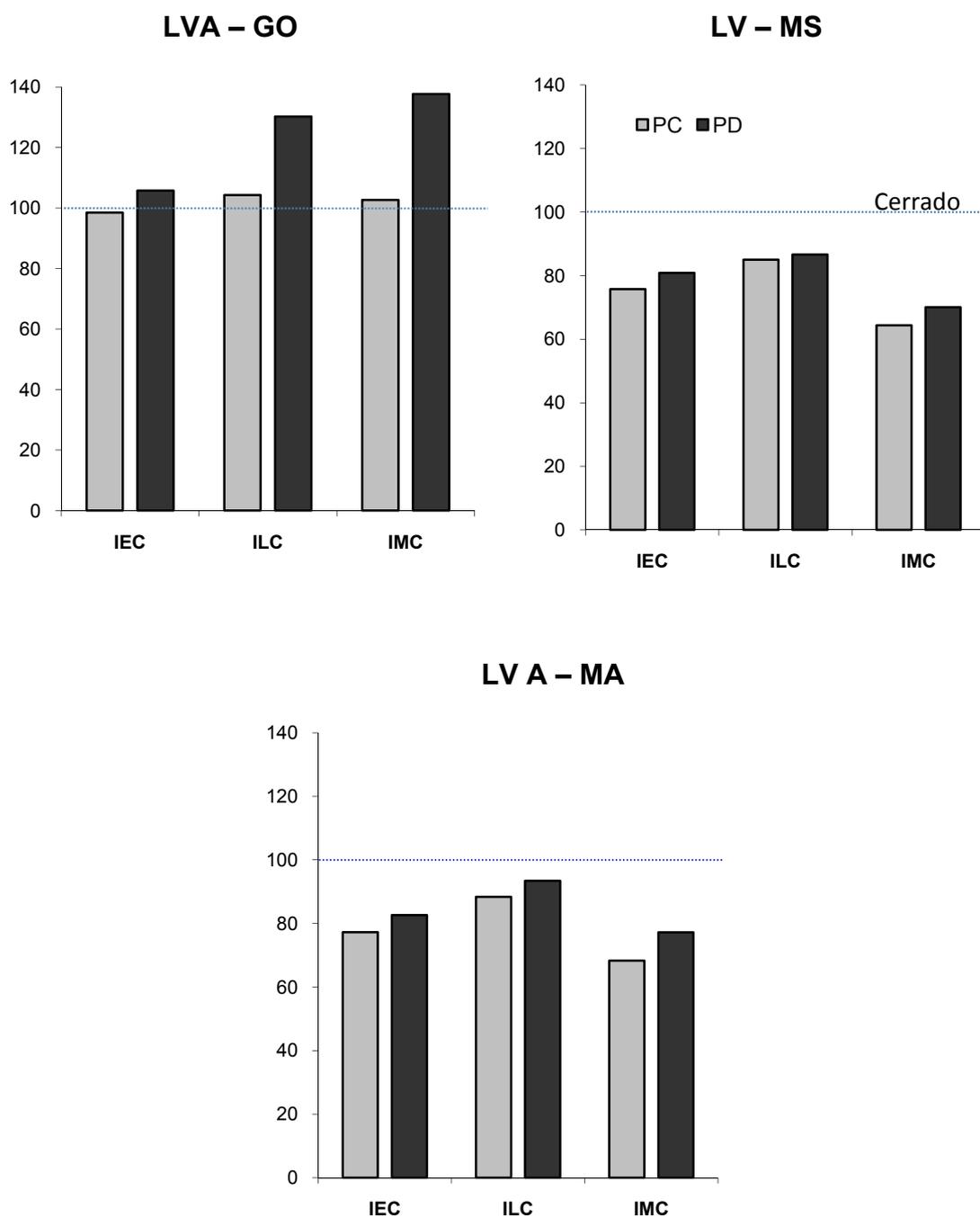


Figura 9. Índice de estoque (IEC), de labilidade (ILC), e de manejo de carbono (IMC) em preparo convencional (PC), plantio direto (PD), utilizando o Cerrado como referência (100%), nos experimentos de Luziânia-GO, Costa Rica-MS e Tasso Fragoso-MA na camada de 0-20 cm.

Nos outros dois solos, ocorreram maiores perdas de C do solo em PC, o que levou a redução de até 36% no IMC, influenciado principalmente pelo IEC que reduziu até 24% (Figura 9b e c), refletindo o efeito conjunto das perdas de C tanto da fração lábil (FL) como da fração não-lábil (FP) no perfil de 0-20 cm (Tabela 7). Porém, mesmo com índices ainda abaixo do CE, ambos os solos apresentam uma tendência de recuperação em PD. Comparado ao IMC do solo em PC, o solo em PD proporcionou um aumento de 5% no IMC do LV-MS, ao longo de 11 anos, e 9% no LVA-MA ao longo de 5 anos (Figura 9).

Segundo Mello (2006), a eficiência de um sistema de manejo na recuperação da qualidade do solo depende de quanto o processo de degradação afetou as relações entre seus componentes. Devido às severas perdas de C no LVA-MA e LV-MS após o longo tempo de uso em PC, anterior a instalação do experimento, espera-se que estes solos apresentavam um estágio de degradação mais avançado em comparação ao LVA-GO. Desta forma, o LVA – GO, mais resistente ao impacto das práticas agrícolas, manteve os estoques e a labilidade do C, mesmo após 28 anos em PC, podendo refletir mais rapidamente os efeitos do PD na melhoria da qualidade do solo e desta forma, possibilitou um maior IMC. Por outro lado, no LV-MS e LVA-MA, o impacto do manejo em PC, foi mais “destrutivo”, necessitando um maior tempo em PD para recuperação da qualidade do solo nos níveis encontrados no solo sob vegetação nativa.

## **6.6 Conclusões**

A conversão do uso do solo com vegetação nativa para sistemas agrícolas em PC levou a degradação da qualidade do solo, com redução principalmente da fração lábil da MOS, enquanto que a conversão de PC para PD proporcionou uma melhoria da qualidade dos três solos avaliados, ao longo de 13 anos no LVA – GO, 11 anos no LVA – GO e 5 anos no LVA-MA, comparado ao solo mantido em PC.

A melhoria na qualidade dos solos em PD foi evidenciada pelo maior IMC em função dos maiores IEC e ILC, sendo este último o mais afetado pelos sistemas de manejo.

A eficiência do PD em recuperar os estoques e a labilidade da MOS é distinta entre solos, e provavelmente esteja relacionada à mineralogia dos solos e ao grau de degradação em que o solo encontra-se na adoção do PD. Maiores informações sobre a mineralogia, a dinâmica da agregação e a estabilidade dos microagregados poderiam ajudar no entendimento dos processos envolvidos na recuperação dos estoques de C do solo.

## **7. ESTUDO III - AGREGAÇÃO DO SOLO E PROTEÇÃO FÍSICA DA MOS AFETADA POR DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM DOIS LATOSSOLOS DO CERRADO**

### **7.1 Introdução**

O sistema de manejo do solo exerce grande influência sobre a agregação do solo, estoques e qualidade da MOS, afetando diretamente a qualidade dos solos. No entanto, a adoção de sistemas de manejo sustentáveis é dependente das condições climáticas. A região do Cerrado, sob clima tropical, apresenta elevadas temperaturas na maior parte do ano e uma estação seca que varia de três a cinco meses, dependendo da localização, com precipitação abaixo do mínimo necessário para desenvolvimento de culturas agrícolas, o que dificulta a adoção de sistemas de manejo com diversificação de culturas e alto aporte de carbono ao solo comparado a região Sul do país, onde as chuvas são mais distribuídas durante o ano.

O sistema de preparo convencional (PC) foi um dos principais responsáveis pela degradação dos solos agrícolas (Silva et al., 1994; Bayer & Mielniczuk, 2008), devido as elevadas perdas dos estoques iniciais de MOS e da qualidade desta pela redução principalmente de suas frações lábeis (Pillon, 2000, Salton, 2005; Bayer et al., 2000a, 2004; Conceição, 2006). Neste sistema de preparo se utiliza intenso revolvimento do solo, aumentando a ruptura dos agregados e a exposição da MOS protegida no seu interior aos agentes decompositores. Além disso, a frequência de operações de revolvimento, não permite a reformação de agregados estáveis. Por outro lado, a utilização de sistemas sem revolvimento ou mobilização do solo, com manutenção da superfície coberta e maior aporte de resíduos, pode reverter a situação das

áreas degradadas e proporcionar estoques e qualidade da MOS até superiores as áreas com vegetação nativa (Zanatta, 2006; Conceição, 2006).

Alternativamente ao PC, a maior parte dos produtores do Cerrado têm optado por cultivo mínimo (CM), o qual se caracteriza por um revolvimento superficial do solo e plantio de uma gramínea, visando a produção de palhada para a cultura comercial. A utilização da gradagem superficial ainda é bastante freqüente na região, visando evitar a queima dos resíduos culturais na estação seca, como também a subsolagem principalmente para a cultura do algodoeiro. Desta forma, uma minoria dos produtores tem utilizado o plantio direto (PD) abolindo totalmente o revolvimento no preparo do solo, como é feito na região Sul do Brasil.

Devido à estreita relação entre a MOS e agregação, com a redução do revolvimento do solo é possível a formação de agregados de maior tamanho e maior estabilidade, que protegem a MOS em seu interior e esta, por sua vez, contribui para manter a estrutura do agregado. Desta forma, a interação entre a MOS e a agregação, é a principal responsável pelo aumento dos estoques e da qualidade da MOS (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003; Conceição, 2006).

O potencial de perda de MOS pode estar relacionado com a labilidade da MOS e ao seu grau de interação com a matriz do solo. A fração inter-agregados (fração leve livre-FLL) é a mais susceptível a decomposição, enquanto que a fração intra-agregados (fração leve oclusa-FLO) é mais protegida, podendo permanecer por períodos maiores no solo (Chistensen et al, 2001). Enquanto que a fração ligada a minerais (fração pesada-FP) é a mais estável e sua dinâmica é influenciada pela estabilidade dos complexos organo-minerais (Chistensen et al, 2001; Bayer et al., 2002). Trabalhos utilizando fracionamento físico densimétrico têm mostrado que as frações leves são mais sensíveis às alterações induzidas pelos sistemas de manejo e por isso constituem um bom indicador na avaliação da qualidade do solo (Roscoe & Machado, 2002; Freixo et al., 2002; Conceição, 2006; Boeni, 2007). Dentre as frações leves, a FLO é a melhor relacionada com a dinâmica da agregação do solo, principalmente dos macroagregados na camada superficial do solo (Conceição, 2006; Boeni, 2007).

Em Latossolos, o predomínio de óxidos na fração argila, em especial a gibbsita e goethita com alta afinidade pela MOS (Cornell & Schwertmann, 1996;

Kämpf et al., 2000), formam microagregados resistentes à dispersão (Ferreira et al., 1999 ; Sá et al., 2005; Vitorino et al., 2003; Inda Junior et al., 2007; Tonin et al., 2007). Se estes microagregados permanecem estáveis às práticas de manejo do solo, espera-se que haja uma menor área exposta para reações de superfície da MOS com a dos minerais do solo, podendo reduzir tanto as taxas de ganho como de perdas de C na fração FP.

Portanto, a estabilidade da MOS é dependente do efeito dos sistemas de manejo na proteção física da MOS, a qual está diretamente relacionada com a dinâmica da agregação do solo. Sistemas de manejo que utilizam gramíneas perenes na região do Cerrado têm demonstrado capacidade de recuperação dos estoques de C do solo e da agregação (Salton, 2005; Boeni, 2007). Porém, em rotação envolvendo somente culturas anuais como milho, soja e algodão, haverá um menor aporte de resíduos comparado às gramíneas perenes, e com sistema radicular pouco agressivo e mal distribuído, podem levar a grandes perdas quando em sistemas de preparo convencional. Entretanto, pouco se sabe sobre os efeitos dos sistemas de manejo na recuperação da agregação e dos estoques totais de C e N do solo inteiro e das frações da MOS, quando da utilização de sistemas de manejo com mínimo (CM) ou ausência (PD) de revolvimento do solo.

## **7.2 Hipóteses**

Em sistemas de manejo com culturas anuais, a redução do revolvimento do solo promovem uma melhoria na agregação do solo, favorecendo a proteção física da MOS, e assim um incremento dos estoques de MOS, principalmente das frações leves, em Latossolos da região do Cerrado;

Latossolos com predomínio de goethita e gibbsita, podem apresentar menor dinâmica de microagregação, reduzindo as taxas tanto de perdas como de ganhos de C da fração ligada aos minerais, induzidas pelas práticas de manejo do solo, por estar protegida no interior destes microagregados.

### **7.3 Objetivos**

Investigar os efeitos da mudança no uso do solo sob vegetação nativa para uso agrícola com preparo convencional na agregação do solo e nos estoques de C e N do solo e das frações físicas da MOS.

Investigar o efeito dos sistemas de manejo em cultivo mínimo e plantio direto sobre os mecanismos de estabilização da MOS, avaliando-se a estabilidade de agregados do solo e as frações físicas da MOS.

### **7.4 Material e métodos**

Para este estudo foram selecionados os dois experimentos de mais longa duração (Costa Rica, 13 anos e Luziânia, 15 anos) utilizados no estudo II, a fim de detectar a influência do manejo a longo prazo. Informações sobre a implantação e condução dos experimentos estão no item 4.

#### **7.4.1 Amostragem do solo**

A amostragem foi realizada em janeiro de 2007, nos três sistemas de preparo: preparo convencional (PC), cultivo mínimo (CM) e o plantio direto (PD), nas três repetições de campo. O solo foi coletado nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, utilizando-se uma pá de corte e espátula. Em cada parcela abriu-se uma trincheira na entrelinha de plantio, e coletou-se um bloco de solo indeformado da espessura da camada amostrada, que foi armazenado em potes plásticos para o transporte. Próximo a cada área experimental, uma área sob vegetação nativa (Cerrado) foi amostrada como referência da condição natural do solo. Em laboratório, os blocos de solo foram desagregados manualmente até toda amostra passar pela peneira de 9,51 mm, seco ao ar e a sombra por 72 h, e armazenadas para as análises de estabilidade de agregados e fracionamento físico. Para facilitar a obtenção de uma sub-amostra homogênea para o fracionamento físico, aproximadamente 100g de agregados < 9,51 mm foram peneirados em peneira de 2 mm, quantificada a massa de agregados em cada parte (> 2,0 mm e < 2,0 mm), e

obtida a proporção destas para compor a amostra de 10 g para o fracionamento físico.

#### **7.4.2 Estabilidade de agregados em água**

Para a avaliação da distribuição dos agregados estáveis em água utilizou-se a metodologia propostas por Carpenedo & Mielniczuk (1990). Duas sub-amostras homogêneas, com 50 gramas de solo (agregados < 9,51 mm) foram obtidas em cada amostra de campo, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Cada sub-amostra foi colocada em filtro de papel (dobrado em forma de "V" e acondicionado em uma lata de alumínio) e deixada umedecendo por capilaridade durante a noite. As amostras umedecidas foram transferidas para tubo plástico de 1000 ml (7,2 cm de diâmetro e 23,5 cm de altura) contendo 500 ml de água e agitada por dois minutos em agitador rotativo a 16 rpm. O conteúdo dos tubos foi transferido para um conjunto de peneiras de malha 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm, o qual foi submetido à oscilação vertical (42 oscilações por minuto) em recipiente com água, durante quinze minutos. A massa de solo que passou através das peneiras durante a agitação e ficou retida no fundo do recipiente com água, foi transferida para um conjunto de duas peneiras (malha 0,105 e 0,053 mm), que foi imerso na água do recipiente dez vezes, sem permitir a entrada de água sobre a peneira superior. O material (< 0,053 mm) que restou na água do recipiente foi floculado com alumínio de potássio (5% m/v).

O conteúdo das sete peneiras foi cuidadosamente transferido para potes plásticos (previamente pesados), de modo a conservar ao máximo a estrutura dos agregados retidos em cada peneira e também evitar perda da matéria orgânica particulada. O material foi seco a 50 °C até atingir peso constante. O material correspondente a mesma amostra (das duas sub-amostras) foi transferido para potes plásticos, correspondentes a sua classe de diâmetro e armazenados.

Na metodologia proposta por Carpenedo & Mielniczuk (1990), é realizada uma segunda etapa, após a obtenção da massa seca de agregados em cada classe, na qual os agregados correspondentes a cada peneira (exceto a < 0,053 mm) são dispersos para obtenção da massa de partículas simples

(cascalho ou areia), que é subtraída da massa de agregados inicial. Entretanto, neste estudo, optou-se por não realizar esta etapa visto que nestes solos não há cascalho e o teor de areia é muito baixo, chegando no máximo a 3% no LVA – GO (Luziânia) e 7 a 8% no LV – MS (Costa Rica). Além disso, mesmo utilizando NaOH (1 mol L<sup>-1</sup>) e agitação durante 16 horas, não se obtém a máxima dispersão dos agregados do solo nestes solos. No caso do LVA – GO, testes preliminares mostraram que até 20% da massa de silte e argila encontram-se em agregados maiores que 0,053 mm, retidos nesta peneira (dados não apresentados). Portanto, a tentativa de separar as partículas simples nestes solos, poderia incorrer em erros maiores do que se esta etapa não fosse realizada.

Foi calculada a percentagem da massa de agregados em cada uma das oito classes de agregados: 9,51-4,76; 4,76-2,0; 2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,105; 0,105-0,053 e < 0,053 mm.

Com a massa de cada classe calculou-se a distribuição percentual de agregados (AGR, em %) em cada classe de diâmetro (*i*), e o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP):

$$AGR = \left( \frac{mAGR\ i}{\sum mAGR\ i} \right) \times 100 \quad \text{onde,}$$

$mAGR\ i$  = massa de agregados da classe *i*

$\sum mAGR\ i$  = massa total de agregados

$$DMP = \left( \frac{\sum (mAGR\ i \times di)}{\sum mAGR\ i} \right) \quad \text{onde,}$$

$di$  = diâmetro médio da classe *i*, obtido por [(malha superior+malha inferior)/2]

### 7.4.3 Fracionamento físico densimétrico

A quantificação das frações orgânicas foi realizada nas três repetições de campo, utilizando amostra de solo com agregados menores que 9,51 mm, e o mesmo procedimento para separação das frações utilizado no estudo II, com exceção da FP (FP), a qual foi recuperada após a filtragem do sobrenadante

contendo a FLO. Para isso, transferiu-se a FP para tubos de centrifuga de 250 mL submeteu-se esta a uma lavagem com 200 mL de água destilada, homogeneização e centrifugação, separação da parte líquida para posterior recuperação do PTS. Em seguida realizou-se uma segunda lavagem, com 150 mL de água destilada + 50 mL de  $\text{CaCl}_2$  ( $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ) e homogeneização da FP, centrifugação e descarte do sobrenadante (devido ao efeito do  $\text{CaCl}_2$  formando precipitados com PTS irreversíveis ao recuperação do produto). Nesta etapa, se utiliza o  $\text{CaCl}_2$  para melhorar a decantação da FP que torna-se mais dispersa após a primeira lavagem, e o objetivo é apenas retirar o excesso de PTS ainda remanescente na primeira lavagem. A FP foi seca em estufa a  $50^\circ \text{C}$  e posteriormente moída em gral de ágata e armazenada para as análises de C e N.

A determinação de C e N do solo inteiro e das frações densimétricas (moídos em gral de ágata) foi realizada por combustão seca. Os estoques de C e N do solo e das frações foram calculados com base em massa equivalente de solo (Ellert & Bettany, 1995) para cada camada amostrada, tomando-se como referência a massa de solo do Cerrado.

#### **7.4.4 Análise estatística**

O tratamento dos dados foi feito como descrito no estudo II (item 5.2.4.4) utilizando a análise de variância vinculada ao teste de aleatorização, conforme método descrito em Pillar & Orlóci (1996) e implementado no software MULTIV (Pillar, 2005).

O teste de aleatorização foi realizado comparando-se os tratamentos entre si (CE, PC, CM e PD), em cada camada de solo, quanto ao DMP, e os estoques de C e N do solo inteiro e das frações (FLL, FLO e FP) da MOS.

### **7.5 Resultados e discussão**

#### **7.5.1 Carbono orgânico e agregação do solo**

Da mesma foram que no estudo II, a interpretação dos resultados foi realizada em duas etapas, primeiramente avaliando os efeitos do PC

convencional após a retirada do CE, e em seguida, a conversão de PC para CM e PD, uma vez que as alterações nos sistemas de uso e manejo ocorreram nesta seqüência. Portanto, avaliou-se duas situações: o efeito do PC utilizado desde abertura do Cerrado realizada em 1974 no LV (Costa Rica-MS) e em 1977 no LVA (Luiziânia-GO), totalizando respectivamente 33 e 30 anos de cultivo em PC na coleta de 2007; e em seguida, como foco principal deste estudo, avaliou-se o efeito da conversão para sistemas de manejo conservacionistas como CM e PD, nos experimentos instalados em 1992 no LVA e em 1994 no LV, totalizando respectivamente 15 e 13 anos de experimento ocasião da coleta (2007). Neste caso os efeitos do CM e PD foram avaliados em comparação ao PC, por que este era o sistema de manejo utilizado na implantação do experimento, e reflete as condições atuais do solo caso nenhum sistema de manejo alternativo fosse implantado.

As concentrações de C ( $\text{g kg}^{-1}$  solo) no perfil do solo variaram de 22,36 a 40,29 no LVA e de 24,01 a 45,59 no LV, enquanto as concentrações de N ( $\text{g kg}^{-1}$  solo) variaram de 1,18 a 2,72 no LVA e 1,16 a 2,33 no LV (Tabela 10), sendo os maiores valores encontrados na camada superficial e os menores na camada de 10-20 cm. Sob vegetação nativa as concentrações de C e N do LV superaram em 57% e 28%, respectivamente, as concentrações do LVA na camada de 0-5 cm. No entanto, para as áreas cultivadas, não houve grandes diferenças entre os dois solos para um mesmo sistema de manejo.

As concentrações de C e N no perfil foram maiores em superfície e decresceram com aumento da profundidade no PD e CE, enquanto que no CM e PC a distribuição no perfil foi mais homogênea devido ao efeito da incorporação dos resíduos no solo, principalmente até os 10 cm. Este comportamento no PD e CE é devido a maior deposição de resíduos em superfície, maior atividade do sistema radicular (Silva & Mielniczuk, 1997) e da fauna do solo (Lavelle et al., 1997) aportando MOS na camada superficial, enquanto que em PC e CM, a gradagem promove a incorporação dos resíduos e uma distribuição mais homogênea no perfil na camada arável, podendo até apresentar maiores concentrações de C e N nas camadas sub-superficiais, como verificado no LV em PC.

Tabela 10. Concentração de carbono (C) e nitrogênio (N) e relação C:N do solo, para as subcamadas de 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS

Sistema de uso e manejo	LVA – GO <sup>1</sup>			LV – MS <sup>2</sup>		
	C	N	C:N	C	N	C:N
	g kg <sup>-1</sup>			g kg <sup>-1</sup>		
	----- 0 – 5 cm -----					
CE	29,06 b	1,69 b	17,2	45,59 a	2,16 a	21,1
PC	27,33 b	1,59 b	17,2	27,07 c	1,50 b	18,1
CM	26,52 b	1,60 b	16,6	28,73 c	1,60 b	18,0
PD	40,29 a	2,72 a	14,8	36,99 b	2,33 a	15,9
	----- 5 - 10 cm -----					
CE	23,92 b	1,36 a	17,6	32,43 a	1,72 a	18,8
PC	25,07 a	1,46 a	17,1	27,36 b	1,53 ab	17,9
CM	25,09 a	1,52 a	16,5	26,69 b	1,45 b	18,5
PD	25,13 a	1,46 a	17,2	26,43 b	1,38 b	19,1
	----- 10 – 20 cm -----					
CE	22,40 a	1,26 a	17,8	26,11 a	1,19 b	22,0
PC	23,05 a	1,30 a	17,8	24,83 b	1,33 a	18,7
CM	23,03 a	1,31 a	17,6	24,66 b	1,29 a	19,1
PD	22,36 a	1,18 a	19,0	24,01 b	1,16 b	20,7

<sup>1</sup> Latossolo Vermelho-Amarelo em Luziânia-GO, <sup>2</sup> Latossolo Vermelho em Costa Rica –MS; CE – Cerrado, PC – preparo convencional, CM – cultivo mínimo, PD - plantio direto.

A variação na relação C:N ao longo do perfil foi mais evidente no PD, onde os valores aumentaram com a profundidade. Além disso, o solo em PD apresentou relações C:N menores do que o solo sob Cerrado, e ainda, no caso do LV, menor que do solo em PC e CM. No entanto, o solo em PD tem com aporte de resíduos das culturas semelhante aos outros sistemas de manejo (PC e CM), indicando que o não revolvimento do solo em PD e a manutenção dos resíduos por maior tempo na superfície do solo, reduz a taxa de decomposição pela menor exposição da MOS aos agentes decompositores, permitindo um maior acúmulo de matéria orgânica lábil no solo neste sistema (Bayer et al., 2000b 2002, 2004; Vieira et al., 2007; Conceição et al., 2006).

Em ambos os experimentos, as maiores variações nos estoques de C e N em função do uso e manejo ocorreram na camada de 0-5 cm (Tabela 11). Nesta camada, a conversão de CE para agricultura em PC no LV-MS levou a reduções de 40% e 30% nos estoques de C e N, respectivamente, em 33 anos, enquanto que no LVA durante 30 anos em PC não houve variações significativas nos estoques de C ou N. Portanto, apesar da agricultura no LV ter iniciado 3 anos antes do que no LVA, não justificaria tamanha diferença visto que as maiores perdas de MOS ocorrem nos primeiros anos após a conversão

de vegetação nativa para uso agrícola (Silva et al., 1994; Mello, 2006; Bortolon, 2008), principalmente para as frações lábeis (Freixo et al., 2002; Bayer et al., 2004; Mello, 2006). Isto indica que o LVA tem uma maior resistência às alterações induzidas pela mudança no sistema de uso do solo.

A conversão de PC para PD proporcionou um aumento significativo dos estoques de C e N em ambos os solos (Tabela 11). No LVA os estoques de C e N em PD foram superiores ao solo em PC em 47% para o C e 71% para o N, superando inclusive o solo sob Cerrado, enquanto que no LV os aumentos em PD foram de 37% para o C e 55% para o N, já superando a vegetação nativa nos estoques de N. Por outro lado, a conversão para CM praticamente não proporcionou melhorias em estoque de C e N, ficando semelhantes ao solo em PC e não diferiu significativamente deste.

Tabela 11. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo, para as subcamadas de 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS.

Sistema de uso e manejo	LVA – GO <sup>1</sup>		LV – MS <sup>2</sup>	
	C	N	C	N
	Mg ha <sup>-1</sup>		Mg ha <sup>-1</sup>	
	----- 0 – 5 cm -----			
CE	14,50 b	0,84 b	18,80 a	0,89 a
PC	13,63 b	0,79 b	11,16 c	0,62 b
CM	13,23 b	0,80 b	11,85 c	0,66 b
PD	20,10 a	1,36 a	15,25 b	0,96 a
	----- 5 - 10 cm -----			
CE	12,31 b	0,70 a	14,75 a	0,78 a
PC	12,90 a	0,75 a	12,44 b	0,70 ab
CM	12,91 a	0,78 a	12,14 b	0,66 b
PD	12,93 a	0,75 a	12,02 b	0,63 b
	----- 10 – 20 cm -----			
CE	22,95 a	1,29 a	26,01 a	1,18 b
PC	23,62 a	1,33 a	24,74 b	1,33 a
CM	23,60 a	1,34 a	24,57 b	1,29 a
PD	22,91 a	1,21 a	23,92 b	1,16 b
	----- 0 – 20 cm -----			
CE	49,76 b	2,83 b	59,57 a	2,86 a
PC	50,15 b	2,87 b	48,35 b	2,64 b
CM	49,73 b	2,92 b	48,56 b	2,61 b
PD	55,93 a	3,32 a	51,20 a	2,75 a

<sup>1</sup> Latossolo Vermelho-amarelo em Luziânia-GO, <sup>2</sup> Latossolo Vermelho em Costa Rica –MS; CE – Cerrado, PC – preparo convencional, PD - plantio direto. Em cada camada, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de aleatorização a 10% de probabilidade.

Nas camadas subsuperficiais as variações nos estoques de C e N foram menores, e apenas na camada de 10-20 cm, do LV, observou-se diferenças significativas entre os sistemas de manejo. Nesta camada os estoques de N do solo em PC e CM superaram o solo em PD. No entanto, considerando a camada de 0-20 cm, os estoques de C e N apresentaram a mesma tendência da camada superficial. No LV a conversão de PC para PD proporcionou um aumento de aproximadamente 6% nos estoques de C e 4% nos estoques de N, enquanto que no LVA o aumento em relação ao PC foi praticamente o dobro para C (11%) e quatro vezes para o N (16%), comparado ao LV.

Os estoques e a qualidade da matéria orgânica estão relacionados ao sistema de manejo que determinam os aportes de biomassa (quantidade e qualidade) e a taxa de decomposição (Bayer et al., 2001 e 2004; Conceição, 2006; Zanatta., 2006), regulando assim os fluxos de matéria e energia no solo (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003). Neste estudo, o sistema de cultura é o mesmo para os três tratamentos, os quais proporcionam um aporte de biomassa semelhante, porém, fatores como o tipo de solo, a textura, a mineralogia e o clima, entre outros, podem determinar uma maior ou menor resistência do solo aos efeitos dos sistemas de preparo no estoque da MOS. Esses fatores interligados influenciam na agregação do solo, que é proveniente da organização dos componentes do sistema solo pelas interações ocorridas desde o início da formação dos solos e atinge níveis crescentes de acordo com aumento da qualidade do solo (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al, 2003).

Em PC, o revolvimento do solo desorganiza a sua estrutura, aumenta a disponibilização dos resíduos à ação dos microrganismos e deixa a superfície do solo descoberta aumentando a incidência direta dos raios solares. Todos esses fatores contribuem para maiores taxas de perda de C ( $K_2C$ ) (Mielniczuk et al., 2003; Salton, 2005; Bayer et al., 2006b), pois aumentam o fluxo de saída de matéria e energia do sistema solo, pelo aumento dos processos dissipativos (Vezzani, 2001). Da mesma forma, o CM que é um dos sistemas de manejo mais utilizados na região do Cerrado atualmente, apresentou características mais próximas ao PC, devido ao revolvimento do solo, mesmo que em menor intensidade. Ao contrário, sob PD os resíduos permanecem por maior tempo na superfície do solo, reduzindo a incidência direta dos raios solares, além disso a

ausência de revolvimento do solo permite um maior tempo de interação entre a MOS e a matriz mineral do solo. Nesta condição, há um maior fluxo interno de matéria e energia no sistema, prevalecendo os processos de ordenação, e uma auto-organização dos seus componentes de forma contínua, surgindo às propriedades emergentes como a agregação, e melhorando a qualidade do solo (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003).

Neste estudo, o padrão de distribuição dos agregados nas diferentes classes de tamanho foi distinto nos dois solos sob CE até os 10 cm de profundidade (Figura 10 e 11). No LVA houve um predomínio da massa de agregados nas classes de 9,51 a 2,00 mm e de 1,00 a 0,25 mm até os 10 cm de profundidade (Figura 10), enquanto que na camada de 10-20 cm (Figura 10) e em todas as camadas do LV (Figura 11) há um predomínio nas classes de 9,51 a 2,00 mm, e menor massa de agregados nas classes de menor tamanho, as quais tiveram uma distribuição de agregados praticamente homogênea de 2,00 a 0,105 mm. Isto demonstra que o LV em sua condição natural apresenta maior potencial de formação de agregados grandes do que o LVA.

Para facilitar a discussão os agregados foram agrupados em 3 classes: sendo uma de microagregados (< 0,25 mm) e duas de macroagregados (0,25 a 2,00 mm e 2,00 a 9,51 mm) (Figura 12). Sob vegetação natural, os macroagregados representaram de 82 a 88 % no LVA e 88 a 90% no LV da massa total de agregados do solo, nas três camadas avaliadas. Dentre estes, os macroagregados > 2 mm representaram em média 44% da massa de solo no LVA, enquanto no LV foram a classe predominante, com 58% dos agregados (Figura 12). Estes resultados são condizentes com outros estudos conduzidos em Lassotosos argilosos na região do CE, nos quais 88% a 96% das estruturas eram de macroagregados, sendo 42% a 76% maiores que 2,00 mm (Salton, 2005 e Boeni, 2006).

As áreas sob vegetação nativa refletem as condições do solo em seu estado estável onde as entradas e saídas de matéria e energia do sistema são equivalentes. No entanto, quando há mudança no tipo de uso do solo, a sua estrutura original é alterada e novos arranjos são estabelecidos de modo a atingir um novo nível de agregação (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003). O manejo do solo em PC levou à redução dos agregados maiores que 2 mm até os 20 cm de profundidade, em relação ao solo sob CE (Figura 12). Este efeito

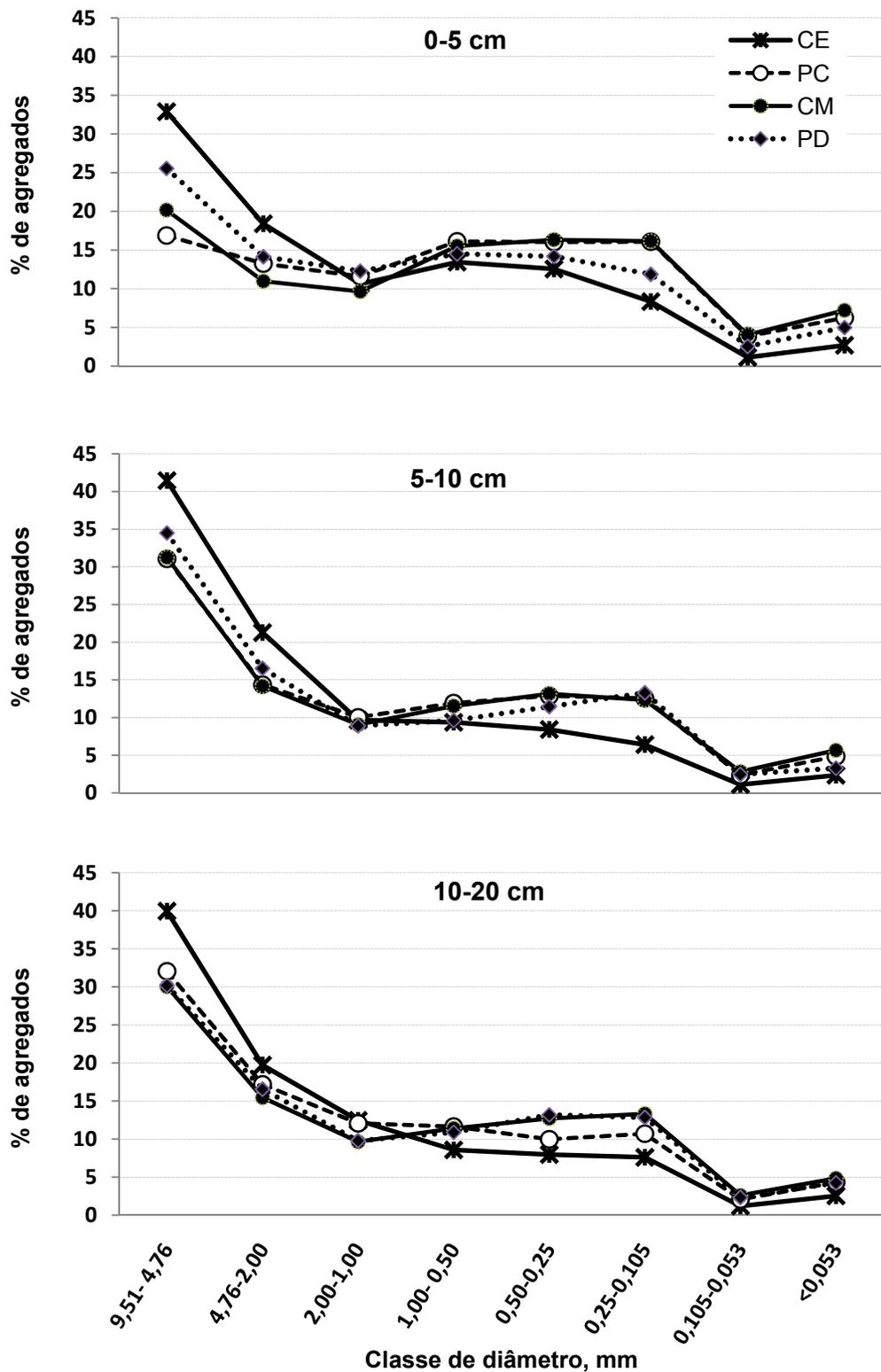


Figura 10. Distribuição percentual da massa de agregados estáveis em água camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, no Latossolo Vermelho-Amarelo, em Luziânia-GO.

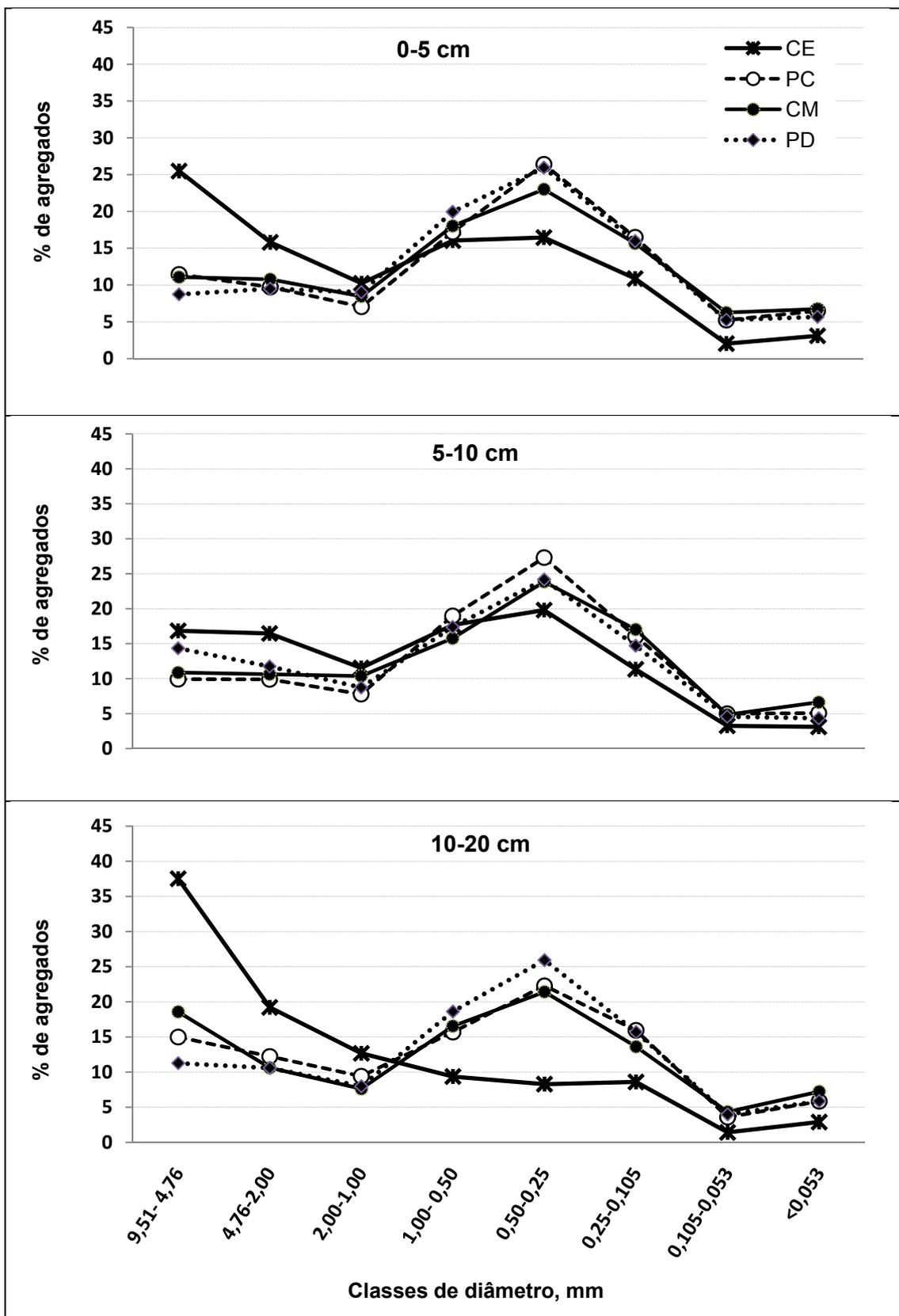


Figura 11. Distribuição percentual da massa de agregados estáveis em água, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, no Latossolo Vermelho, em Costa Rica-MS.

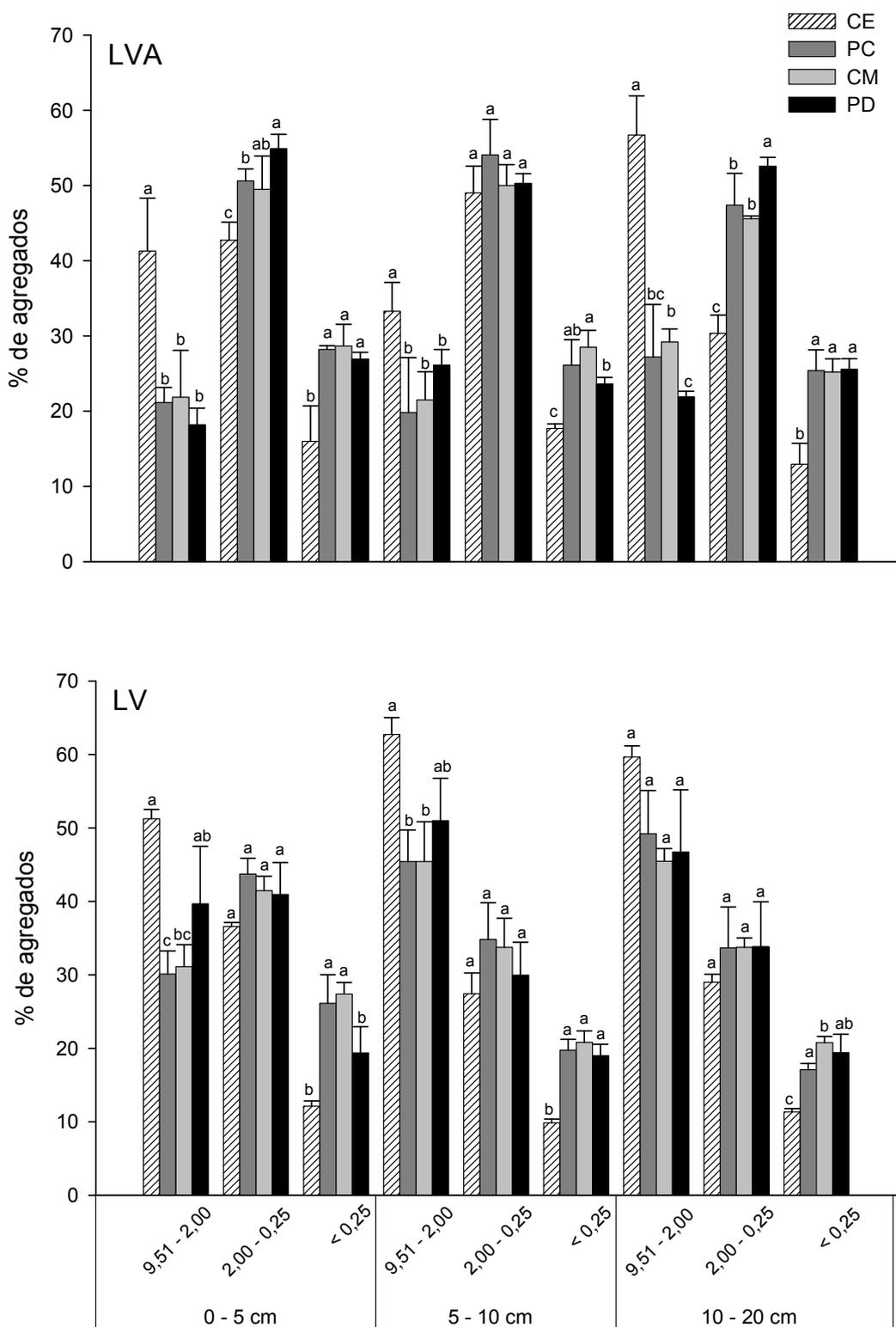


Figura 12. Distribuição dos agregados estáveis em água em classes de 9,51 – 2,00, 2,00 - 0,25 e < 0,25 mm, em Luziânia-GO (LVA) e em Costa Rica-MS (LV). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de aleatorização à 10% de probabilidade.

foi maior no LVA, no qual ocorreu redução de praticamente 50% da massa de macroagregados maiores que 2,00 mm, os quais foram redistribuídos principalmente nas classes de tamanhos de 0,50 a 0,105 mm (Figura 10).

No LV a redução da massa de agregados grandes ocorreu principalmente na camada de 0-5 cm, porém com menor magnitude que no LVA. Nesta camada o solo em PC teve redução 41% da massa de agregados em comparação ao CE (Figura 12), porém a redistribuição nas classes de menor tamanho foi mais uniforme (Figura 11). A conversão de PC para CM ou PD teve pouco efeito na distribuição de agregados no LVA, e não promoveu incrementos em estruturas maiores que 2 mm, enquanto que no LV a utilização do PD proporcionou a recuperação de praticamente metade da massa de agregados maiores que 2 mm destruídos com uso do PC, na camada de 0-5 cm. A formação de agregados estáveis maiores que 2,00 mm depende principalmente da ação dos agentes agregantes temporários, como as raízes das plantas e hifas de fungos (Gryze et al., 2005; Six et al., 2004), e por isso são bastante influenciados pelas práticas de manejo do solo (Tisdal & Oades, 1982; Hayes & Beare, 1996; Silva & Mielniczuk et al., 1997; Bronick & Lal, 2005). Estes agentes agregantes promovem a união de estruturas de agregados menores, formando um núcleo de agregação com partículas de MOS em seu interior, o que aumenta a proteção desta contra decomposição e ao mesmo tempo a MOS mantém a estrutura do agregado (Golchin et al., 1994a, 1997, Six et al., 2000a).

Com um aporte constante de matéria orgânica ao solo e sistema radicular ativo e bem distribuído, associado ao um sistema de manejo sem revolvimento mecânico do solo, como o PD, é possível um maior tempo de interação os resíduos orgânicos e a matriz do solo, proporcionando a formação de estruturas maiores e mais estáveis, e assim, um aumento no nível de agregação do solo (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003; Conceição et al., 2005) e conseqüentemente uma maior proteção física da MOS (Conceição et al., 2008; Boeni, 2007). Por outro lado, em sistemas com intenso revolvimento do solo, como PC, mesmo com alto aporte de MOS e sistema radicular ativo, o ciclo de formação de agregados grandes e mais estáveis é interrompido a cada etapa de revolvimento, e a MOS é exposta à decomposição, não possibilitando

o rearranjo das estruturas menores para formação de estruturas maiores (Silva e Mielniczuk, 1997; Salton et al., 2007; Conceição, 2006),

Neste estudo o aporte de resíduos nos sistemas de manejo PC, CM e PD foi praticamente o mesmo, no entanto o sistema PD proporcionou um elevado acúmulo de MOS, superando inclusive os valores do solo sob CE, no LVA. Entretanto, não houve incrementos na massa de agregados maiores que 2 mm neste solo, o que pode estar relacionado à ação do sistema radicular das culturas utilizadas nos experimentos. Além disso, em condições naturais, o LVA apresentou uma percentagem de agregados grandes (9,51-2,00 mm) menor do que o LV, e também menor do que os dados em literatura para Latossolos com textura semelhante. Estudos realizados em Latossolos verificaram que em sistemas com pastagem ou integração lavoura-pecuária, mais de 50% da massa de agregados estáveis em água era maior que 2 mm (Boeni, 2006; Salton et al., 2008), sendo a presença permanente de gramíneas no sistema um fator determinante para melhorar a agregação, podendo apresentar até 90% da massa de agregados com tamanho maior que 2 mm em áreas com gramíneas perenes.

Vários autores têm salientado que a formação e estabilização de estruturas de agregados grandes são extremamente dependentes da atividade do sistema radicular e da biota do solo (Oades & Waters, 1991; Tisdal & Oades, 1982; Hayes & Beare, 1996; Silva & Mielniczuk, 1997), porém neste estudo, em ambos os experimentos utilizou-se a rotação milho/soja/algodão na estação chuvosa e pousio na estação seca, deixando o solo sem culturas em desenvolvimento na maior parte do ano. A única gramínea que entra na rotação é o milho, e permanece com sistema radicular ativo somente durante o ciclo da cultura, no máximo quatro meses. Além disso, nas últimas três safras não se cultivou milho, reduzindo muito a contribuição das raízes. Por outro lado, no LVA sob CE, apesar de apresentar estoques de MOS menores do que o PD, a presença de gramíneas perenes pode ter contribuído para a formação e manutenção das estruturas maiores que 2 mm, reforçando a importância do sistema radicular na formação de agregados grandes.

A variação no diâmetro médio ponderado úmido (DMP) entre os tratamentos foi similar à verificada para os agregados maiores que 2 mm (Figura 13). Verificou-se diferença entre os sistemas de manejo no DMP

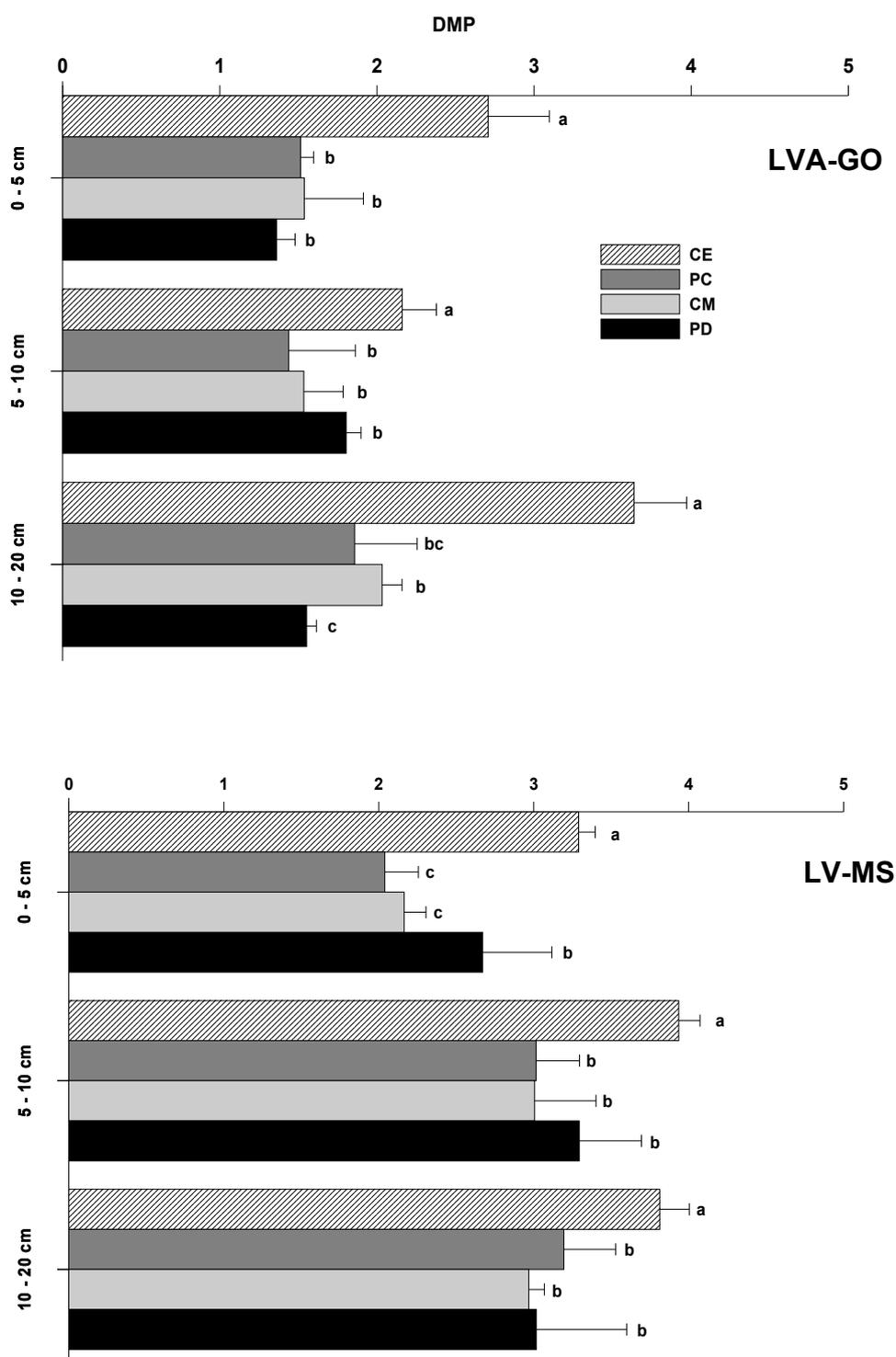


Figura 13. Diâmetro médio ponderado úmido (DMP) dos agregados do Latossolo Vermelho Amarelo em Luziânia-GO (LVA-GO) e Latossolo Vermelho em Costa Rica-MS (LV-MS), nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de aleatorização à 10% de probabilidade.

apenas na camada de 0-5 cm do LV com aumento no DMP na seguinte ordem: PC < CM < PD < CE, indicando uma tendência à recuperação do solo, sendo o sistema PD mais eficiente que o CM. Vários autores têm relacionado aumento nos estoques de C com aumento no DMP, em sistemas com ausência de revolvimento do solo, principalmente na camada de 0-5 cm, onde o efeito dos sistemas de manejo é mais intenso (Silva e Mielniczuk, 1997; Salton, 2005; Conceição, 2006). Este aumento do DMP dos agregados, em contrapartida promove maior proteção física da MOS, possibilitando aumentos de carbono principalmente na fração oclusa.

## 7.5.2 Fracionamento físico

### 7.5.2.1 Concentrações de C e N nas frações e relação C:N

As maiores variações na concentração de C e N entre os tratamentos ocorreram nas frações leves da camada superficial (Figura 14), e diminuiu com aumento da profundidade no perfil. As concentrações de C reduziram com aumento da profundidade em todas as frações, assim como o estoque de C do solo. Na FLL o estoque de C ( $\text{g kg}^{-1}$  solo) variou 0,75 a 11,97 no LVA e de 0,65 a 6,51 no LV, enquanto que na FLO as variações foram de 3,18 a 7,16 no LVA e de 3,19 a 8,97 no LV. Para a FP as diferenças no perfil foram menores, e os valores de concentração de C ( $\text{g kg}^{-1}$  solo) variaram de 17,33 a 21,16 no LVA e 19,35 a 30,11 no LV.

As concentrações de N ( $\text{g kg}^{-1}$  solo) da FLL variaram de 0,03 a 0,80 no LVA e de 0,01 a 0,28 no LV, enquanto na FLO variou de 0,39 a 0,08 no LVA e de 0,08 a 0,41 no LV. Na FP as concentrações de N ( $\text{g kg}^{-1}$  solo) variaram de 1,05 a 1,53 no LVA e 1,03 a 1,71 no LV. Em geral, em ambos os solos as variações na concentração de C e N nas frações seguiram a mesma tendência do solo inteiro, tanto nas diferenças entre os tratamentos como na distribuição no perfil do solo, exceto para a FP no LVA que praticamente não apresentou gradiente no perfil e os tratamentos foram semelhantes.

Correlacionando-se as concentrações de C e N totais com as frações da MOS para todos os tratamentos (Tabela 12), observa-se que no LVA a FLL foi a que apresentou melhor relação com o COT, seguido da FLO e FP, demonstrando que a variação do C total do solo no LVA foi influenciado

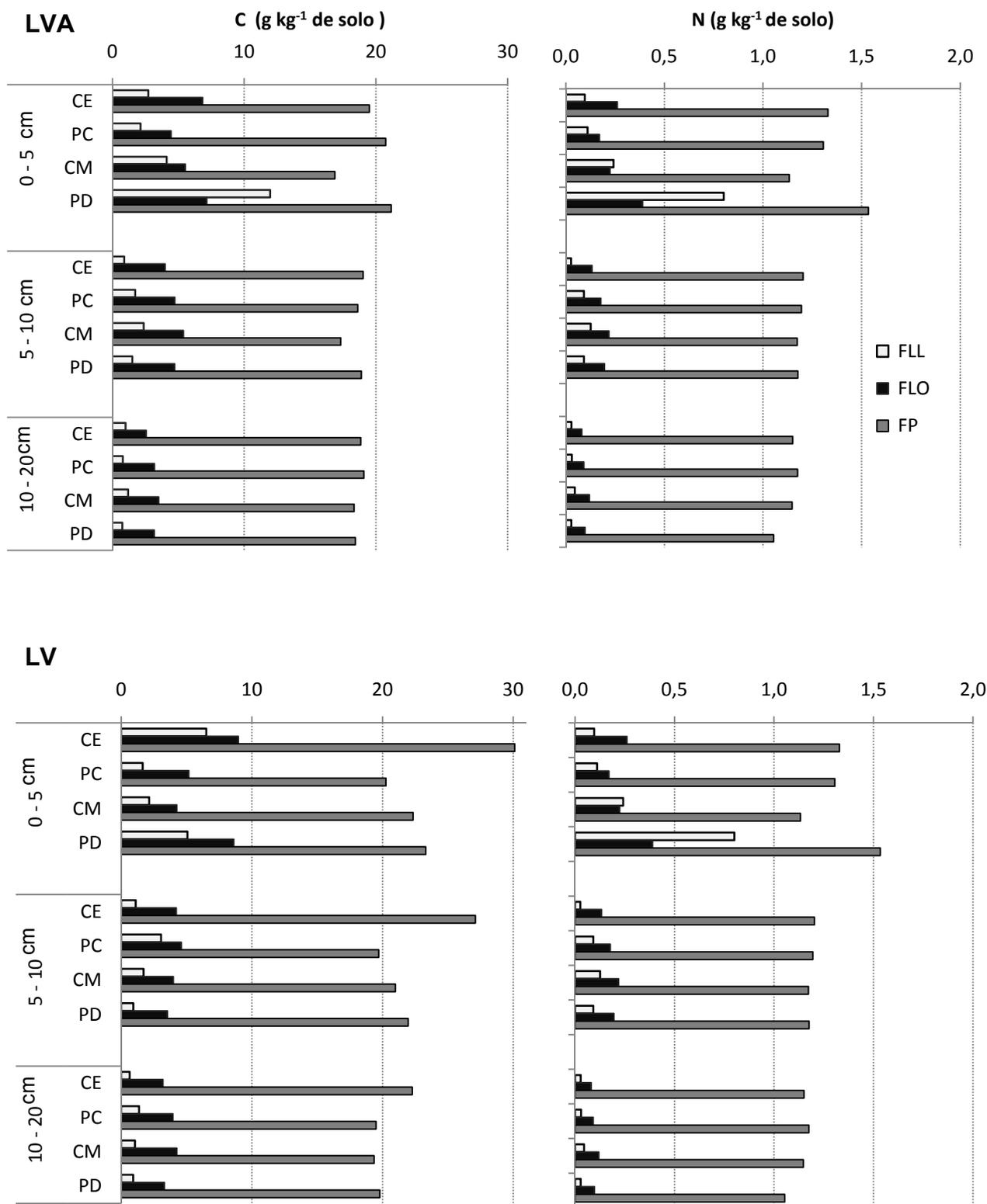


Figura 14. Concentração de carbono (C) e nitrogênio (N) das frações da MOS, para as subcamadas de 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS.

principalmente pela FLL. No LV, por sua vez, tanto a FLL e a FLO apresentaram as mais altas correlações com o COT. Por outro lado, a FP foi melhor relacionada com as concentrações de NT, o que possivelmente está associado às diferenças nas entradas e saídas de C e N do sistema. No caso destes experimentos, o C entra no sistema solo principalmente pela adição de resíduos vegetais das plantas cultivadas, e necessita do processo de decomposição para as transformações até a interações com os minerais do solo (FP). Neste processo, cerca de 60% do C é perdido via CO<sub>2</sub>. Por outro lado, as entradas de N no solo ocorrem tanto via fixação biológica como adubação química, sendo este último armazenado diretamente no complexo de troca até que seja absorvido pela planta, e na análise de fracionamento físico densimétrico, seria recuperado como FP.

Tabela 12. Correlação entre as concentrações de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo inteiro com as frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP) da MOS, das três subcamadas de 0-20 cm.

	<b>FLL</b>	<b>FLO</b>	<b>FP</b>
LVA, Luziânia - GO			
C	0,96	0,82	0,61
N	0,71	0,87	0,87
LV, Costa Rica - MS			
C	0,90	0,90	0,89
N	0,87	0,88	0,93

No geral, a relação C:N das frações foram maiores no LV do que no LVA (Figura 15), seguindo a mesma tendência das relações C:N do solo inteiro (Tabela 10). Em áreas de Cerrado, uma maior incidência de fogo pode levar a aumento na relação C:N das frações, tanto pelo acúmulo de carvão no solo como pelo aumento da abundância de gramíneas C<sub>4</sub> na área devido a redução na vegetação arbórea com a queima (Roscoe et al., 2000). Estes autores verificaram relações C:N da serrapilheira do Cerrado variando de 36 a 73, a qual aumentou com a frequência de queimadas. Dentre os tipos de vegetação, a maior relação C:N é das gramíneas C<sub>4</sub>, em média 102, enquanto que as plantas C<sub>3</sub> apresentaram C:N em torno de 44, o que favorece o aumento da relação C:N da MOS em áreas com maior predomínio de gramíneas.

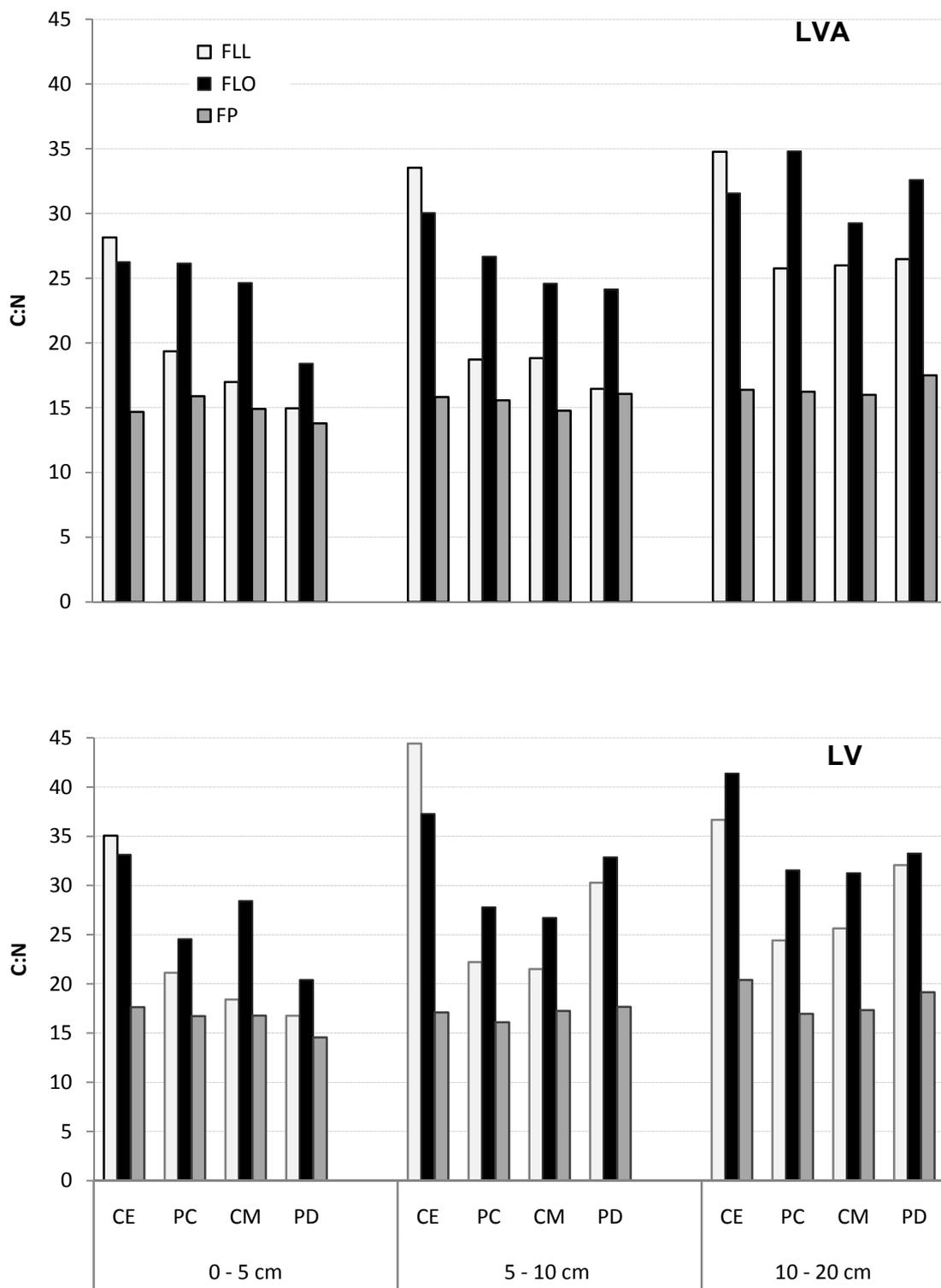


Figura 15. Relação C:N das frações da MOS, para as subcamadas de 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e LV em Costa Rica-MS.

Em ambas os solos sob CE houve uma tendência decrescente nos valores de relação C:N no sentido FLL>FLO>FP, diretamente proporcional a ordem de decomposição da MOS. Após a adição de um resíduo orgânico ao solo este passa por um processo de decomposição que vai desde um material menos decomposto (FLL), mais semelhante ao material de origem, a um material intermediário (FLO), até um material mais decomposto (FP), já transformado pelos microrganismos e composto principalmente por seus metabólitos, e por isso com uma relação C:N menor que as frações leves (Knicker, & Ludemann, 1997; Christensen, 2001; Golchin et al., 1994a). Estas transformações no solo são mediadas pelos mecanismos de estabilização da MOS (recalcitrância, oclusão e interação organo-mineral) com efeito cumulativo (Golchin et al., 1994a; Conceição et al., 2008), ou seja, a FP que apresenta os três mecanismos de estabilização, recalcitrância, oclusão e interação coloidal, em geral representa um maior fração do estoque de C do solo, mesmo com menor relação C:N do que as frações leves.

A mudança no padrão de vegetação, aportando resíduos de culturas (soja, milho e algodão) com menor relação C:N do que o CE, levou a reduções na relação C:N das três frações da MOS, nos três sistemas de manejo avaliados, em ambos os solos. Entretanto, a FLO passou a apresentar os maiores valores de relação C:N, ficando em ordem decrescente FLO>FLL>FP.

A magnitude das alterações na relação C:N após a conversão do CE para áreas com culturas anuais está relacionada com os mecanismos de estabilização da MOS que influenciam o tempo de meia vida e a dinâmica de aporte de um novo material em cada fração. Considerando que o tempo de meia vida das frações no solo aumenta no sentido FLL<FLO<FP, o aporte de resíduos com menor relação C:N do que o CE afetou primeiramente a FLL (Figura 15), que é a mais sensível as mudanças no uso do solo, pois não está protegida nem pela estrutura dos agregados nem pela interação os minerais, dependendo apenas das taxas de aporte e decomposição dos resíduos.

No entanto, materiais altamente resistentes como o carvão podem permanecer no solo por muito tempo, mesmo em sistema com alta taxa de decomposição da MOS como o PC. Nos solos avaliados foi possível observar após 30 anos de cultivo no LVA e 33 anos no LV, pedaços de carvão visíveis a olho nú (observação de campo), inclusive no solo em PC. Desta forma, um

sistema que aporte mais FLL como o PD pode apresentar um efeito de “dispersão” devido ao aumento relativo de FLL proveniente das culturas, com menor relação C:N, em relação a FLL residual do CE (principalmente carvão). No PC, por sua vez, a decomposição é mais acelerada, e provavelmente a relação entre a FLL proveniente das culturas e a residual do CE seja menor, e por isso apresentando maior relação C:N do que o PD.

A FLO por sua vez é alterada mais lentamente que a FLL, pois depende da dinâmica de formação dos agregados para que novo material seja acumulado por oclusão dentro destes, e provavelmente seja esta a razão para a pequena variação na relação C:N da FLO. A FP, que conta com os três mecanismos de estabilização (recalcitrância, oclusão e associação com minerais), já apresentava os menores valores de relação C:N sob vegetação nativa, e permaneceu com a relação praticamente constante na conversão para uso agrícola. Desta forma, a FLO apresentou a maior relação C:N entre as três frações, porém é possível que com o decorrer do tempo, mantendo-se o mesmo tipo de manejo do solo, a FLO pode ser substituída por material proveniente das culturas com menor relação C:N que o CE, chegando a apresentar valores iguais ou menores que a FLL, como verificado em ambiente natural.

Na camada de 0-5 cm, onde os efeitos do manejo são mais evidentes, a relação C:N da FLL entre os sistemas de manejo reduziu no sentido  $PC < CM < PD$ . O mesmo foi observado para a FLO nas camadas de 0-5 e 5-10 cm no LVA, onde ocorreram os maiores aumentos na concentração de C e N das frações leves (Figura 14), e assim, a redução nos valores de relação C:N foi mais intensa, refletindo inclusive na FLO.

#### 7.5.2.2 *Estoques de C e N nas frações*

Nas Tabela 13 e 14 estão apresentados os estoques de C e N das frações da MOS e o percentual de participação de cada fração nos estoques totais de C e N. Verificou-se que na camada superficial, a conversão de CE para PC levou a perdas significativas de C e N em todas as frações da MOS no LV, em maior quantidade na FP, enquanto no LVA as perdas foram observadas apenas na FLO. A conversão para CM não apresentou melhorias em relação ao PC, enquanto que o PD proporcionou aumentos significativos de C e N das

Tabela 13. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) das frações da MOS e suas contribuições nos estoques totais de C e N do solo, para as subcamadas de 0–20 cm, em Luziânia-GO

Sistemas de uso e manejo do solo	C			N			C			N								
	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP						
	..... Mg ha <sup>-1</sup> .....						.....%											
	----- 0-5 cm -----																	
CE	1,36	b	3,42	b	9,73	<sup>ns</sup>	0,05	c	0,13	b	0,66	<sup>ns</sup>	9	24	67	6	15	79
PC	1,07	b	2,22	c	10,35		0,06	c	0,08	c	0,65		8	16	76	7	11	82
CM	2,05	b	2,76	b	8,42		0,12	b	0,11	b	0,57		15	21	64	15	14	71
PD	5,97	a	3,57	a	10,83		0,40	a	0,19	a	0,77		30	18	53	29	14	56
	----- 5-10 cm -----																	
CE	0,46	c	2,06	b	9,79	<sup>ns</sup>	0,01	b	0,07	c	0,62	<sup>ns</sup>	4	17	80	2	10	88
PC	0,89	b	2,43	a	9,58		0,05	a	0,09	b	0,61		7	19	74	6	12	82
CM	1,22	a	2,77	a	8,92		0,06	a	0,11	a	0,60		9	21	69	8	14	77
PD	0,78	b	2,43	a	9,72		0,05	a	0,10	ab	0,61		6	19	75	6	13	80
	----- 10-20 cm -----																	
CE	1,02	a	2,62	b	19,31	<sup>ns</sup>	0,03	<sup>ns</sup>	0,08	b	1,18	<sup>ns</sup>	4	11	84	2	6	91
PC	0,81	b	3,26	a	19,55		0,03		0,09	b	1,20		3	14	83	2	7	91
CM	1,21	a	3,59	a	18,79		0,05		0,12	a	1,18		5	15	80	3	9	87
PD	0,77	b	3,25	a	18,89		0,03		0,10	ab	1,08		3	14	82	2	8	89
	----- 0-20 cm -----																	
CE	2,83	c	8,10	<sup>ns</sup>	38,83	<sup>ns</sup>	0,09	<sup>ns</sup>	0,28	b	2,46	<sup>ns</sup>	6	16	78	3	10	87
PC	2,76	c	7,92		39,47		0,13		0,28	b	2,47		6	16	79	5	9	86
CM	4,48	b	9,12		36,13		0,23		0,35	a	2,34		9	18	73	8	12	80
PD	7,51	a	9,25		39,44		0,48		0,39	a	2,45		13	17	70	14	12	74

CE- Cerrado; PC- preparo convencional; CM – cultivo mínimo; PD – plantio direto. Médias seguidas de mesma letra, na camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de aleatorização a 10% de probabilidade. <sup>ns</sup> - a diferença entre os grupos na análise de variância não foi significativa.

Tabela 14. Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) das frações da MOS e suas contribuições nos estoques totais de C e N do solo, para as subcamadas de 0–20 cm, em Costa Rica-MS

Trat	C			N			C			N		
	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP
..... Mg ha <sup>-1</sup> .....						.....%.....						
----- 0-5 cm -----												
CE	2,68 a	3,70 a	12,42 a	0,08 a	0,11 a	0,70 a	14	20	66	9	13	79
PC	0,68 c	2,13 b	8,35 bc	0,03 c	0,09 b	0,50 b	6	19	75	5	14	81
CM	0,88 b	1,75 c	9,21 b	0,05 b	0,06 c	0,55 b	7	15	78	7	9	83
PD	1,95 a	3,41 a	9,89 a	0,12 a	0,17 a	0,68 a	13	22	65	12	17	70
----- 5-10 cm -----												
CE	0,50 b	1,92 <sup>ns</sup>	12,33 a	0,01 b	0,05 <sup>ns</sup>	0,72 a	3	13	84	1	7	92
PC	1,39 a	2,09	8,96 b	0,06 a	0,08	0,56 b	11	17	72	9	11	80
CM	0,78 b	1,81	9,55 b	0,04 a	0,07	0,55 b	6	15	79	6	10	84
PD	0,42 b	1,61	9,99 b	0,01 b	0,05	0,57 b	4	13	83	2	8	90
----- 10-20 cm -----												
CE	0,65 b	3,18 <sup>ns</sup>	22,19 a	0,02 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	1,09 <sup>ns</sup>	2	12	85	1	6	92
PC	1,36 a	3,94	19,43 b	0,06	0,12	1,15	6	16	79	4	9	86
CM	1,05 a	4,24	19,28 a	0,04	0,14	1,11	4	17	78	3	11	86
PD	0,91 ab	3,30	19,71 a	0,03	0,10	1,03	4	14	82	2	9	89
----- 0-20 cm -----												
CE	3,84 a	8,80 <sup>ns</sup>	46,94 a	0,11 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	2,51 <sup>ns</sup>	6	15	79	4	8	88
PC	3,43 a	8,17	36,75 b	0,15	0,29	2,20	7	17	76	6	11	83
CM	2,71 b	7,81	38,03 a	0,13	0,27	2,22	6	16	78	5	10	85
PD	3,29 a	8,31	39,60 a	0,16	0,32	2,27	6	16	77	6	11	83

CE- Cerrado; PC- preparo convencional; CM – cultivo mínimo; PD – plantio direto. Médias seguidas de mesma letra, na camada, não diferem significativamente entre si pelo teste de aleatorização a 10% de probabilidade. <sup>ns</sup> - a diferença entre os grupos na análise de variância não foi significativa.

frações leves. Devido à incorporação dos resíduos no PC e CM, estes sistemas de manejo apresentaram estoques de C e N da FLL nas camadas subsuperficiais maiores que o solo em PD.

Mesmo não havendo alterações nos estoques de C e N no LVA (Tabela 11) após 30 anos em PC (1977-2007), ocorreram reduções nos estoques das frações leves da MOS (Tabela 13), indicando uma perda de qualidade da MOS (Christensen, 1992; Golchin et al., 1994a, Conceição et al., 2008). A maior perda de FLO em relação à FLL, na camada superficial, está possivelmente associada à redução de praticamente a metade da massa de agregados maiores que 2 mm (Figura 12). Após a conversão do sistema PC em CM ou PD (1992-2007), apenas o sistema PD proporcionou recuperação na FLL e FLO, superando tanto o solo em PC como do CE nas camadas de 0-5 cm e 0-20 cm. Comparado ao solo que permaneceu em PC, o solo em PD proporcionou um aumento de 5,6 vezes no estoque de C-FLL e 6,7 vezes no estoque de N-FLL, nos 20 cm do solo.

A FLO em PD no LVA apresentou estoques de C e N, respectivamente, 1,2 e 2,4 vezes maior que o PC na camada de 0-20 cm, no entanto, este aumento de MOS na FLO não pode ser atribuído ao aumento no DMP, como verificado por Conceição (2006). Como discutido no item 7.5.1, não houve recuperação da massa de agregados maiores que 2 mm, no entanto, observou-se um predomínio de macroagregados de tamanho 0,25 a 2,0 mm em PD, comparado aos outros sistemas de manejo, o que pode ter contribuído para o aumento de FLO nesta classe de tamanho de agregados. Porém, provavelmente não seja a ação do sistema radicular o principal responsável pelo acúmulo de FLO neste tamanho de agregados, visto a baixa presença de gramíneas, e sim outros agentes agregantes como as hifas de fungos e atividade da fauna do solo.

O acúmulo de material orgânico na camada superficial pode estimular o maior desenvolvimento de fungos que contribuem para agregação do solo (Gryse et al., 2005). Uma evidência disso é a maior quantidade de glomalina (glicoproteína produzida por fungos arbusculares) na camada de 0-5 cm do solo em PD nos dois experimentos (dados não apresentados). O PD apresentou mais que o dobro desta proteína em comparação ao PC, sendo os maiores valores para o LVA, indicando a maior presença de fungos

micorrízicos neste solo. Outra evidência da dinâmica da FLO no PD do LVA é a redução na relação C:N da FLO, indicando que houve acúmulo de MOS no interior destes agregados, a qual pode ser proveniente dos resíduos culturais ou de hifas de fungos.

No LV após 33 anos de PC (1974-2007) as reduções dos estoques de C e N das frações com a substituição do CE pela agricultura em PC foram mais intensas que no LVA, afetando todo perfil de 0-20 cm (Tabela 14). Na camada superficial todas as frações da MOS em PC foram significativamente menores do que o CE quanto aos estoques de C e N, porém no total de 0-20 cm somente o estoque de C da FP diferiu significativamente do CE, influenciado pelas perdas que ocorreram também abaixo dos 5 cm para esta fração, enquanto que nas frações leves, houve acúmulo na camada de 5-10 cm.

A conversão de PC para PD levou a recuperação do estoques de C e N em PD, enquanto que para CM os estoques foram próximos e até inferiores aos do solo em PC. Na camada de 0-5 cm do solo em PD os estoques de C e N aumentaram respectivamente, 2,9 e 4,0 vezes na FLL, 1,6 e 1,9 na FLO e 1,2 e 1,4 na FP, comparados ao solo mantido em PC, ficando os estoques em PD iguais estatisticamente ao do CE. Entretanto, na camada de 0-20 cm, apenas na FP ocorreram ganhos significativos de C com a conversão para PD, porém com valores ainda abaixo do solo sob CE. Esta fração representou mais de 80% do C na camada de 0-20 cm (Tabela 14), e por ser a menos dinâmica no solo, o tempo de experimento ainda não foi suficiente para recuperar todo C da FP perdido durante o tempo em PC (Tabela 11).

A participação das frações da MOS nos estoques de C e N aumentam no sentido  $FLL < FLO < FP$  (Tabela 13 e 14). Esta distribuição está de acordo com os mecanismos de estabilização da MOS que prevê maiores estoques com aumento da proteção da MOS (Golchin et al., 1994a; Six et al., 2002). Outros trabalhos também observaram o mesmo comportamento, quando utilizando solução de PTS no fracionamento físico densimétrico (Conceição et al., 2006; Boeni, 2007) que permite uma melhor eficácia na recuperação da FLO (Conceição et al., 2007). A única exceção neste estudo ocorreu na camada de 0-5 cm do LVA em PD, onde o estoque de C e N na FLL foi praticamente o dobro do estoque na FLO. E estas duas frações juntas

representaram praticamente a metade (48%) do estoque de C do solo nesta camada (Tabela 13).

Considerando que o sistema de manejo é semelhante nas duas áreas avaliadas, o maior acúmulo de FLL no LVA em PD (Tabela 13) pode ter sido favorecida por condições climáticas locais, como a temperatura na superfície do solo, umidade relativa do ar e distribuição de chuvas, que podem influenciar a atividade da macro e meso fauna do solo, as quais são as principais responsáveis pela fase inicial de decomposição, pela fragmentação e incorporação dos resíduos no solo, para posterior ação dos microrganismos decompositores (Lavelle et al., 1997). Além disso, em Luziânia (LVA) há uma menor precipitação pluviométrica média anual e mais concentrada do que em Costa Rica (LV) (Figura 2). A estação seca prolongada e a altitude em torno de 1000 m condicionam a uma baixa umidade relativa do ar durante o dia, e baixas temperaturas durante a noite, o que possivelmente tenha influenciado a taxa de decomposição dos resíduos na camada superficial, devido à influência destes fatores sobre a macro e meso fauna (Lavelle et al., 1997).

A contribuição de cada fração da MOS para o C e N total do solo foi semelhante entre os tratamentos das duas áreas avaliadas, com exceção do PD no LVA (Tabela 13 e 14). A FLL representou até 15% dos estoques de C e N, a FLO até 24% do C e 15% do N e, a maior parte na FP, a qual representou até 85% do C e 92% do N.

No perfil do solo, a percentagem de C e N armazenado nas frações leves em geral decresceu em profundidade, e conseqüentemente houve um aumento relativo na participação das frações pesadas, com maior magnitude no PD e CE, onde a deposição dos resíduos se dá em superfície. Em PC, a FLL no LV e a FLO no LVA apresentaram estoques de C e N na camada de 5-10 cm maiores que de 0-5 cm, em função do efeito da gradagem que incorpora os resíduos das culturas no solo. No LV os estoques de FLL na camada de 5-10 cm foram praticamente o dobro da camada superficial, porém este aumento pode ser um efeito temporário do preparo do solo. A coleta de solo foi realizada em janeiro, sendo que no LV a gradagem para plantio havia sido feita há um mês, enquanto que no LVA esta operação foi realizada dois meses e meio antes da coleta. Como a FLL tem um curto tempo de meia vida no solo, este elevado estoque na camada subsuperficial pode ser efeito a curto prazo do

preparado do solo devido à incorporação dos resíduos. Entretanto, a incorporação dos resíduos em subsuperfície por ação mecânica da grade, não tem contribuído para enriquecimento do C do solo nas frações FLO e FP ao longo do tempo (Tabela 14).

Os efeitos do PD para a maioria das variáveis analisadas ocorreram principalmente na camada superficial, e poderiam ser motivo de questionamentos sobre a qualidade do solo nas camadas subsuperficiais. No entanto, esta camada tem grande importância no sistema solo, pois é a interface para as relações de troca do solo como a atmosfera, mediando entradas de energia (ex. radiação solar) e matéria (ex. água da chuva), bem como as saídas para atmosfera, como a emissão de gases.

Neste estudo, utilizou-se a relação entre os estoques de C e N da camada superficial e o estoque total na camada de 0-20 cm ( $C$  ou  $N_{0-5\text{ cm}}/C$  ou  $N_{0-20\text{ cm}}$ ) (Figura 16), visando verificar quanto do estoque de C e N de cada fração acumulados nos 20 cm de profundidade é devido à contribuição da camada de 0-5 cm. Em ambiente natural, onde a entrada de MOS no solo ocorre somente via sistema radicular e resíduos da parte aérea incorporados pela ação da macro e mesofauna, a participação das frações na camada de 0-5 cm diminui no sentido  $FLL > FLO > FP$ , como observado no solos sob CE. Neste ambiente, a camada de 0-5 cm representou até 48% dos estoques de C da FLL da camada de 0-20 cm no LVA, e 70% no LV. Para a FLO e FP a contribuição da camada superficial foi semelhante entre os dois solos, representando 42% na FLO e 25-26% na FP. Nos sistemas cultivados, a contribuição da camada de 0-5 cm no C e N das frações leves foi menor em PC e CM, comparados ao solo sob CE devido à incorporação dos resíduos, enquanto que o solo em PD superou o CE. Desta forma o acúmulo de FLL na camada de 0-5 cm, em relação à camada de 0-20 cm, aumentou, com a redução na taxa de revolvimento do solo.

No LV, onde os efeitos do PC foram mais severos, o percentual de C e N da FLL armazenado na camada superficial reduziu de 70% para 20% na FLL, e de 42% para 26% na FLO. Os demais tratamentos, apesar da redução na participação das frações leves, a ordem de acúmulo das frações na camada superficial permaneceu a mesma do solo sob Cerrado ( $FLL > FLO > FP$ ).

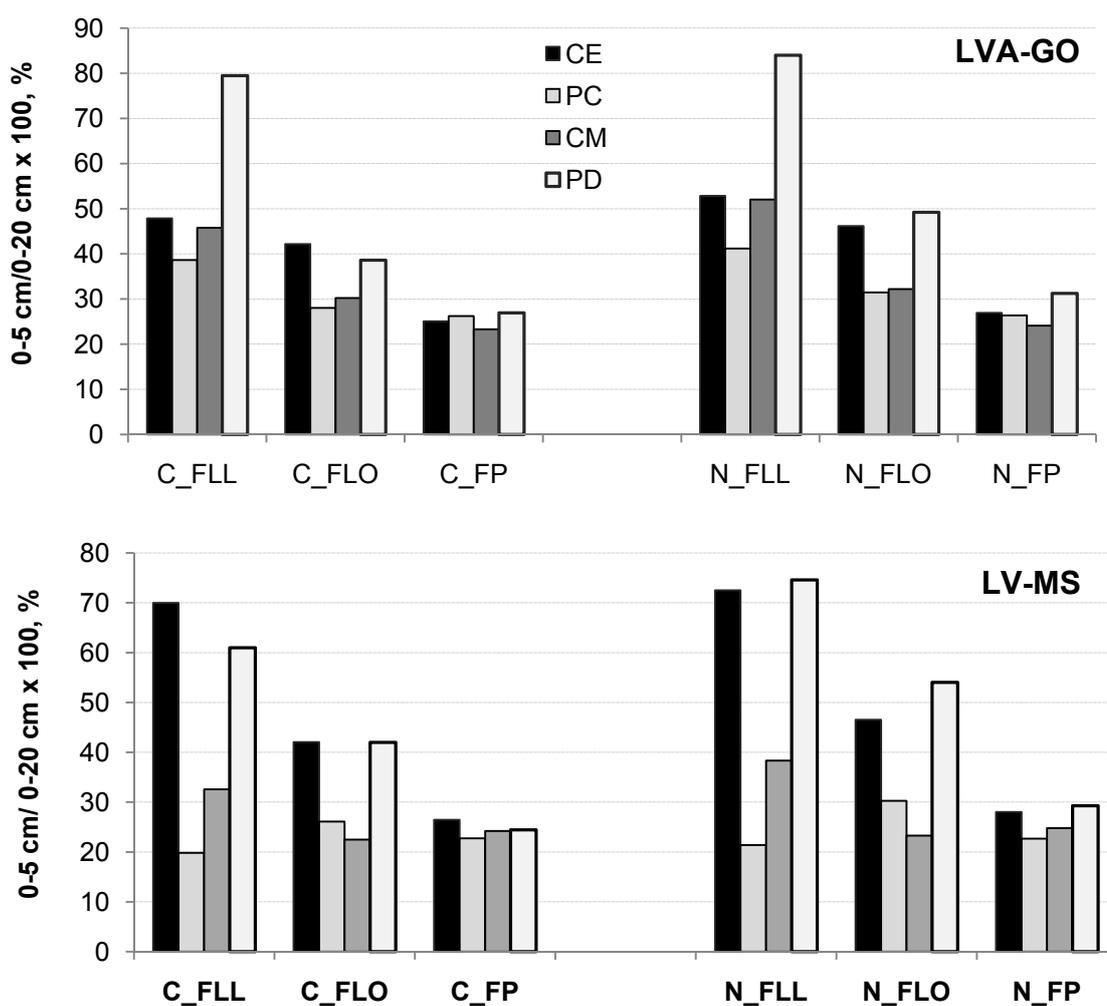


Figura 16. Contribuição da camada de 0-5 cm nos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) da camada de 0-20 cm, nas três frações da MOS do LVA em Luziânia-GO e do LV em Costa Rica-MS.

A distribuição dos estoques de N seguiu o mesmo padrão do C em todas as frações nos dois solos. A mudança no uso do solo afetou o acúmulo de C e N das frações na camada de 0-5 cm, principalmente nas frações leves, com maior intensidade para FLL do LV.

No sistema CM, observou-se um efeito positivo no acúmulo de FLL na camada superficial em relação ao PC, no entanto, na FLO apenas o PD apresentou acúmulos expressivos na camada de 0-5 cm

### 7.5.2.3 *Dinâmica do C e N nas frações da MOS e contribuições na variação total de C e N nos solos.*

Visando avaliar em termos relativos quanto cada fração contribuiu para a variação nos estoques totais de C e N, em função dos sistemas de manejo adotados, calculou-se a relação entre a variação no estoque de C e N de cada fração ( $\Delta$  C ou N da fração) e a variação no C ou N do solo inteiro ( $\Delta$  COT ou  $\Delta$ NT do solo inteiro), entre dois tratamentos. Esta interpretação foi desenvolvida em duas partes. Primeiramente avaliou-se o efeito do uso do solo em PC com base no solo sob Cerrado ( $\Delta = \text{CE-PC}$ ), considerando os estoques do solo sob CE como referência (CE=100%), para verificar como o manejo afetou cada compartimento da MOS e a resistência de cada solo ao ser utilizado um sistema de manejo altamente degradativo. Em outra etapa, foi comparado o efeito da adoção do PD ( $\Delta = \text{PD} - \text{PC}$ ) em substituição ao PC, considerando neste caso o PC como referência (PC=100%). As diferenças entre o CM e o PC não foram apresentadas, visto que a conversão para CM não diferiu do PC na maioria dos atributos avaliados.

A Tabela 15 mostra as variações (deltas) dos estoques de C e N do solo inteiro e das frações para CE-PC e PD-PC e quanto cada fração contribuiu para perda ou ganho de C ou N na camada de 0-5 cm e de 0-20 cm.

No LVA praticamente não houve perdas de C e N totais do solo inteiro com uso do PC (CE-PC), enquanto que na conversão para PD (PD-PC) ocorreram ganho de 6,06 Mg ha<sup>-1</sup> de C e 0,45 Mg ha<sup>-1</sup> de N na camada de 0-20 cm, os quais foram devidos aos acúmulos de MOS na camada superficial do solo. Nesta camada, as frações da MOS mais afetadas pela conversão do CE em PC foram as não associadas a minerais, as quais representaram (FLL + FLO) uma redução de -1,48 Mg ha<sup>-1</sup> nos estoques de C, sendo maior a perda na FLO (-1,19 Mg ha<sup>-1</sup>). Na camada de 0-20 cm observou-se a mesma tendência, e valores semelhantes à camada superficial, indicando que a maior parte da variação nos estoques de C e ocorreu na camada de 0-5 cm. Para o N, a contribuição das frações na perdas e ganhos de C foi semelhante ao C, com única diferença na camada de 0-20 cm, a conversão de CE para PC afetou principalmente a FLL.

Tabela 15. Variação no estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo e das frações orgânicas, para a camada de 0-5 cm e 0–20 cm, no LVA em Luziânia-GO e no LV em em Costa Rica-MS

Profundidade (cm)	$\Delta$	$\Delta$ ( Mg C ha <sup>-1</sup> )				$(\Delta \text{ fração} / \Delta \text{ COT}) \times 100$			$\Delta$ ( Mg N ha <sup>-1</sup> )				$(\Delta \text{ fração} / \Delta \text{ NT}) \times 100$		
		COT	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	NT	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP
..... LVA, Luziânia-GO .....															
0 - 5	CE- PC	-0,86	-0,29	-1,19	0,62	-34	-138	72	-0,05	0,01	-0,05	-0,01	14	-91	-23
	PD - PC	6,74	4,90	1,35	0,48	73	20	7	0,58	0,34	0,11	0,13	59	19	22
0-20	CE-PC	0,39	-0,07	-0,18	0,65	-19	-47	166	0,04	0,04	-0,01	0,01	106	-30	24
	PD - PC	6,06	4,75	1,34	-0,03	78	22	0	0,45	0,34	0,13	-0,02	73	27	0
..... LV, Costa Rica-MS .....															
0 - 5	CE-PC	-7,63	-2,00	-1,57	-4,07	-26	-21	-53	-0,27	-0,04	-0,02	-0,20	-16	-9	-75
	PD - PC	4,09	1,41	1,42	1,26	34	35	31	0,34	0,09	0,09	0,16	27	26	47
0-20	CE-PC	-11,22	-0,40	-0,63	-10,18	-4	-6	-91	-0,22	0,04	0,05	-0,31	21	22	-142
	PD - PC	2,85	-0,01	0,29	2,56	0	10	90	0,11	0,02	0,04	0,05	16	33	51

$\Delta$  – variação no estoque de C ou N entre dois tratamentos; LVA – Latossolo Vermelho-Amarelo, LV – Latossolo Vermelho; CE – Cerrado, PC – preparo convencional, PD – plantio direto.

CE-PC – variação do estoque de C ou N da área em PC comparado ao solo do CE, durante 30 anos de PC no LVA (1977-2007) e 33 anos no LV (1974-2007); PD-PC – variação do estoque de C ou N da área em PD comparado ao solo em PC, durante 15 anos (1992-2007) no LVA e 13 anos no LV (1994-2007).

A elevada contribuição da FLO nas perdas de C e N do LVA-GO pode estar relacionada com a redução de praticamente metade da massa de agregados maiores que 2 mm pelo intenso revolvimento do solo (Figura 12).

No LV, onde houve intensas perdas de C e N totais do solo com o uso do solo em PC (CE-PC), todas as frações contribuíram para esta redução, em especial na FP (Tabela 15). Na camada de 0-5 cm, do estoque total de C perdido ( $7,53 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) 53% foi devido as perdas na FP, enquanto que para o N a FP representou 75% ( $0,34 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) das perdas. Na camada de 0-20 cm, a contribuição da FP para as perdas foi ainda maior, 91% para o C, enquanto que as perdas de N na FP representaram 142% das perdas de NT, sendo compensado em parte pelo acúmulo de N nas outras frações. Portanto, o LV foi menos resistente a ação do PC, principalmente na camada de 0-5 cm onde ação dos sistemas de uso e manejo são mais evidentes.

A conversão de PC para PD (PD-PC), por 13 anos propiciou aumento nos estoques de C e N totais, tanto para camada superficial como para os 20 cm, com acúmulo em todas as frações (Tabela 15. Variação no estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo e das frações orgânicas, para a camada de 0-5 cm e 0-20 cm, no LVA em Luziânia-GO e no LV em em Costa Rica-MS. Na camada de 0-5 cm, onde ocorreu o maior acúmulo das frações leves (Figura 16), estas tiveram maior participação no aumento dos estoques de C e N do que na camada de 0-20 cm. As contribuições das três frações para os estoques totais de C na camada superficial foram muito similares, enquanto que para os estoques de N, a FP teve maior contribuição (47%). Na camada de 0-20 cm, da mesma forma que as perdas de C e N com uso do PC, os ganhos em PD ocorreram principalmente na FP, na qual do total de C acumulado no solo, 90% ( $2,85 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foi devido a FP, 10% na FLO, enquanto que no acúmulo de N, 51% ( $0,11 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) foram devido à FP, 33% à FLO e 16% à FLL. Portanto, nesta camada tanto nas perdas como nos ganhos de C e N, a contribuição das frações aumentou na seguinte ordem  $FLL < FLO < FP$ .

A dinâmica das frações da matéria orgânica no solo é mediada pelos mecanismos de estabilização da MOS (recalcitrância, proteção física e associação aos minerais) atuantes em cada uma delas (Sollins, 1996, Golchin et al, 1994). Portanto, tanto as perdas como o acúmulo destas frações no solo são dependentes da ação destes mecanismos (Golchin et al., 1994a; Six et al.,

2002; Conceição, 2006). Desta forma, é esperado que os sistemas de uso e manejo do solo afetem primeiramente os estoques de FLL, mantida no solo apenas pela sua recalcitrância, seguida da FLO que além da recalcitrância é protegida pela oclusão em agregados, e da FP que conta com os três mecanismos (recalcitrância+oclusão+interação coloidal). No entanto, neste estudo os dois solos comportaram-se diferentemente tanto na resistência às perdas de MOS nas frações como na dinâmica de acúmulo de C nestas frações. No LVA apenas as frações leves foram afetadas pelo manejo do solo, enquanto que no LV a FP foi a que mais afetou a variação dos estoques totais de C. Desta forma, os mecanismos de estabilização influenciaram tanto na proteção contra as perdas de MOS em cada fração, como na dinâmica de recuperação dos estoques de C destas frações no solo.

A dinâmica de FLL no solo depende apenas da taxa de acúmulo e incorporação dos resíduos orgânicos no solo e de decomposição, influenciadas apenas pela recalcitrância intrínseca dos resíduos aportados ao solo. Por outro lado, a dinâmica da FLO e FP depende do processo de dispersão e formação de agregados no solo, bem como da interação da MOS com a fração mineral (Christensen, 2001). Se o processo de desagregação do solo não for tão intenso, de modo a preservar as estruturas de agregados menores, a FLO perdida será principalmente aquela localizada no interior de agregados grandes e entre os agregados menores. Quanto a FP, desde que estas estruturas de microagregados se mantenham unidas, reduz-se a área exposta para que o C associado aos minerais seja perdido. Portanto, maiores perdas de C da FP devem ocorrer em situações com maior dispersão do solo, para que a MOS ligada aos minerais fique exposta. E, para o aumento da MOS na FP é necessário que haja inicialmente superfície exposta para as interações com a MOS ocorrerem (Hassink, 1997; Eusterhues et al., 2005).

O acúmulo de MOS na FLO depende basicamente da oclusão no interior dos agregados enquanto que a FP depende da interação com as partículas minerais. No caso do LVA, houve intensa perda de FLO com uso do solo em PC, pela dispersão dos agregados grandes (Figura 12), porém, a maioria dos agregados permaneceram em classes intermediárias, entre 0,105 e 0,50 mm, os quais provavelmente são bastante resistentes a dispersão possibilitando maior preservação da FP. Quanto à mineralogia, o LVA

apresenta maiores teores de gibbsita que o LV, o que lhe confere alta estabilidade de microagregados, como verificado pela elevada energia necessária para dispersão do LVA ( $1096 \text{ J mL}^{-1}$ ) comparado ao LV ( $407 \text{ J mL}^{-1}$ ) (Tabela 2).

No processo de recuperação do solo os acúmulos de MOS na fração mineral também irão depender da dinâmica de agregação do solo, pois necessita de área exposta para as interações. Pode-se dizer que os microagregados no LVA tiveram um comportamento semelhante a partículas de silte e areia para reações de superfície. Este comportamento dos microagregados em Latossolos foi verificado por outros autores, pela dificuldade de dispersão dos solos para análise de textura, onde após agitação com NaOH, permaneciam no solo pseudo-silte e pseudo-areia formados por partículas de argila na forma de microagregados (Vitorino et al., 2003).

O LV por sua vez, parece apresentar maior dinâmica de agregação nas estruturas menores, permitindo uma maior dinâmica da MOS na FP. Além disso, este solo teve maior tempo em PC (20 anos) que o LVA (15 anos) antes da instalação do experimento, o que pode ter levado a maiores alterações nos constituintes do solo (Mello, 2006).

## **7.6 Conclusões**

A mudança de uso do solo de CE para sistemas agrícolas em PC levou a degradação da qualidade do solo, com redução na estabilidade de agregados em ambos os solos e reduções estoques totais de C e N no LV.

A utilização do CM e PD por 13 anos no LV e 15 anos no LVA não contribuiu para melhorar agregação no LVA enquanto que no LV houve um incremento na estabilidade de agregados, mais evidente no solo em PD. Para os estoques de C e N o sistema PD proporcionou incrementos significativos, até superando os valores do solo sob CE no LVA, enquanto que o CM não apresentou diferenças em relação ao PC.

Em Latossolos do Cerrado, com mesma textura e aporte semelhante de resíduos em culturas anuais, evidências apontam a mineralogia com um fator chave para o comportamento diferenciado destes solos na dinâmica de C e N nas frações físicas da MO.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADÁMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L.G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W.J. **Solos do Cerrado: Tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina, DF: EMBRAPA; São Paulo: Nobel, 1985. p.33-73.
- ASHMAN, M. R.; HALLETT, P. D.; BROOKES, P. C. Are the links between soil aggregate size class, soil organic matter and respiration rate artefacts of the fractionation procedure? **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.35, p.435-444, 2003.
- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 31, p. 697-710, 2000.
- BALDOCK, J. A. et al. Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 35, p. 1061-1083, 1997
- BALDOCK, J. A.; OADES, J. M.; WATERS, A. G.; PENG, X.; VASSALLO, A. M.; WILSON, M. A. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 16, p. 1-42, 1992.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology Biochemistry**, Amsterdam, v. 28, p. 1261-1263, 1996.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.215-230, 2000.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e funções da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L.; CANELLAS, L. P. ; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais**. 2.ed. rev., atual. e amp. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.7 a 18.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 599-607, 2000a.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 95-104, 2000b.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S. C.; MILORI, D. M. B. P.; BAGNATO, V. S. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v. 105, p. 81-92, 2002.

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

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p.237–245, 2006a.

BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, p. 217-226, 2006b.

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 Agricultural Research**, Collingwood, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BOENI, M. **Proteção física da matéria orgânica em solos de Cerrado afetada pela pastagem**. 2007. 136f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BORTOLON, E. S. O. **Simulação do impacto da agricultura sobre os estoques de carbon orgânico do solo e o balanço de CO<sub>2</sub> regionais integrando o modelo Century e sistemas de informação geográfica**. 2008. 161f. Tese (Doutorado) -

Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, Local de publicação, v.124, p.3-22, 2005.

BRODOWSKI, S.; JOHN, B.; FLESSA, H.; AMELUNG, W. Aggregate-occluded black carbon in soil. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.57, p.539-546, 2006.

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

CARPENEDO, V. MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p.99-105, 1990.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. F. ; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, p.45-51, 2002.

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

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L. MIELNICZUK, J. Eficiência do politungstato de sódio no fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p.1301-1310, 2007.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p.541-549, 2008.

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.425-431, 1999.

COSTA, F.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p.10-17, 2008.

- CORNELL, R.M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. New York: VCH Publishers, 1996. 573p.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v.20, p.1-90, 1992.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal Soil Science**, Dordrecht, v.52, p.345-353, 2001.
- DALAL, R. C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 24, p.301-309, 1986.
- DENG, Y.; DIXON, J. B. Soil organic matter and organic - mineral interactions, In DIXON, J.B.; SCHULZE, D. G. (Eds.) **Soil Mineralogy with Environmental Applications**. Madison : Soil Science Society of America, 2002. p. 69 – 107.
- DICK, D. P.; GONÇALVES, C. N.; DALMOLIN, R. S. D.; KNICKER, H. ; KLAMT, E.; KNABNER, I. K.; MARTIN NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, p. 319-333, 2005.
- DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. 165 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks en physical fractions of a subtropical acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 268, p. 319-328, 2005, v. 268, p. 319-328, 2005.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, p.529-538, 1995.
- EUSTERHUES, K.; RUMPEL, C.; KÖEGEL-KNABNER, I. Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: importance of specific surface area, iron oxides and micropores. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.56, p. 753–763, 2005.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.507-514, 1999.

- FRANZLUEBBERS, A. J. et al. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, p. 95-106, 2002.
- FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; SILVA, C. A.; FADIGAS, F. S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 26, p. 425-434, 2002.
- GOLCHIN, A.J. M.; OADES, J. O. ; SKJEMSTAD ; CLARK, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscope. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 32, p. 285-309, 1994a.
- GOLCHIN, A. et al. Soil structure and carbon cycling. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 32, p. 1043-1068, 1994b
- GOLCHIN, A. et al. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregates dynamics. In: LAL, R. (ed.) **Soil processes and the carbon cycle**. CRC Press, Boca Raton, FL. 1997, p.245-266.
- HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 191, p. 77-87, 1997.
- HAYNES, R. J.; BEARE, M. H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 29, p. 1647-1653, 1997.
- INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethite e hematite via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.29, p.851-866, 2005.
- INDA JUNIOR, A. V. ; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; SALTON, J.C.; TONIN, A. T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 1301-1307, 2007.
- KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Mineral surfaces and soil organic matter. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.54, p.219–236, 2003.
- KÄMPF, N.; SCHEINOST, A. C.; SCHULZE, D. G. Oxides minerals. In: SUMNER. M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton, FL.: CRC Press, 2000. p. F125 – F168.
- KNICKER, H.; LÜDEMANN, H. D.  $\text{N}^{15}$  and  $\text{C}^{13}$  CPMAS and solution NMR studies of  $\text{N}^{15}$  enriched plant material during 600 days of microbial degradation. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 23. p. 329-341, 1995.

LARSON, W. E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. p. 37–51. 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. 37-51. (Special Publication, 35)

LAVELLE, P. BIGNELL, D. AND LEPAGE, M. Soil function in a changing world. The role of invertebrate ecosystem engineers. **European Journal of Soil Biology**, Oxford, v. 33, p.159- 193, 1997.

LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, P.L.O.A.; FERNANDES-FILHO, E.I.; NEVES, J.C.L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-till and disc-plow systems using the Century model. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 183–195, 2004.

LÜTZOW, M. VON.; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions- a review. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.57, p.426-445, 2006.

MACEDO, J. **Produção de Alimentos: O Potencial do Cerrado**. Planaltina DF : EMBRAPA-CPAC, 1996. (Documentos, 59). 33p.

MANLY, B. F. J. **Randomization and Monte Carlo methods in biology**. London: Chapman & Hall, 1991. 281 p.

MENDES, I. C.; SOUZA, L. V.; RESK, D. V. S.; GOMES, A. C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 435-443, 2003.

MELLO, N. A. de. **Efeito de sistemas de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo**. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: uma síntese histórica. **Revista Agronomia**, Porto Alegre, v.12, n. 2, p.11-22, 1999.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L.; G.; LIMA, J. M.;

LOPES, A. S. S.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2003. v.3. p.209-248.

OADES, J. M.; WATERS, A. G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, p. 815-828, 1991.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil** (Historical Archive), Dordrecht , v. 76, p. 319-337, 1984.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p.1173-1179, 1987.

PILLAR, V. D.; ORLÓCI, L. On randomization testing in vegetation science: multifactor comparisons of relevé groups. **Journal of Vegetation Science**, Uppsala, v. 7, n. 4, p. 585-592, 1996.

PILLAR, V.D. **MULTIV**: multivariate exploratory analysis, randomization testing and bootstrap resampling. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

PILLON, C, N. **Alterações no conteúdo da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de cultura em plantio direto**. 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.

PINHEIRO-DICK, D.; SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolution and physicochemical treatments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, p. 49-63, 1996

PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; van BREEMEN, N.; JONGMANS, A. G. Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 56, p. 453-467, 2005.

RASSE, D.P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 269, p. 341-356, 2005

RESCK, D. V. S.; VASCONCELLOS, C. A. ; VILELA, L.; MACEDO, M. C. M. Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pastureland on soil carbon pool and dynamics. In: RATTAN, L.; KIMBLE, J.; STEWART, B. A. (Org.). **Global Climate Change and Tropical Ecosystems**. Boca Raton: CRC Press, 2000, p. 169-196

RESENDE, M.; KER, J.C.; BAHIA, A.F.C. Desenvolvimento sustentável do Cerrado. In: ALVARES V., V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. (Eds). **O solo nos**

**grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado.**

Viçosa: SBCS, 1996. p.169-199.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J. ; PEREIRA, J.A.A. Effects of fire on soil organic matter in a "Cerrado sensu-stricto" from Southeast Brazil as revealed by changes in  $\delta^{13}\text{C}$ . **Geoderma**, Amsterdam, v.95, p. 141-160, 2000.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a cerrado Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, p. 107-119, 2003.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 86p.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J.; VASCONCELLOS, C. A. . Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 104, p. 185-202, 2001.

ROSCOE, R.; MADARY, B. E.; MACHADO, P. L. O de A. Fracionamento físico do solo na obtenção de compartimentos mensuráveis para uso em simuladores da dinâmica da matéria orgânica. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M. ; SALTON, J. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas**. Dourados : Embrapa, 2006. p.17-42

SÁ, M. A. C. ; LIMA, J. M. de. **Energia ultra-sônica: uma ferramenta em ciência do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005 (Série Documentos).

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.11-21. 2008.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura pastagem em ambiente tropical**. 2005. 258 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 313-319, 1995.

SCHMIDT M. W. I.; NOACK A. G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 14, p. 777-794, 2000.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do

oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p. 542-544, 1994.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 113-117, 1997.

SIX, J. et al. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.32, p. 2099-2103, 2000a.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter: II.

A normalized stability index and the effect of mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1042-1049, 2000b

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil** v. 241, p. 155-176, 2002.

SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J. A.; OADES, J. M.; MCCLURE, S. G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 34, p. 251–276, 1996.

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

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496 p.

TAN, K. H. Degradation of soil minerals by organic acids. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. (Eds). **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p.1-25

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

TOMAZI, M. **Modificações da dinâmica de nutrientes, dos atributos físicos, e das frações densimétricas da matéria orgânica sob diferentes usos em Latossolos de Juruena-MT**. 2004. 68f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Agricultura Tropical, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2004.

TONIN, A. T.; OLIVEIRA, C. A.; PAVINATO.; TOMAZI, M.; INDA JUNIOR, A. V.; BAYER, C. Estabilidade de complexos organominerais em Latossolos brasileiros. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 31., Gramado – RS, 2007. **Anais...** Gramado, 2007.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v. 96, p. 195-204, 2007.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 133-141, 2003.

WILSON, M. A. **NMR Techniques And Applications In Geochemistry And Soil Chemistry**. Oxford: Pergamon, 1987. 353p.

WOOMER P.L.; MARTIM, A.; ALBRECHT, A.; RESCK, D. V. S.; SCHARPENSEEL, H. W. The importance and management of soil organic matter in the tropics. In: WOOMER, P.L.; SWIFT, M. J. (Eds.) **The biological management of tropical soil fertility**. Chichester: J.Wiley & Sons, 1994. p.47-80.

ZANATTA, J. A. **Estoque e labilidade do carbono em frações da matéria orgânica de um Argissolo afetado por sistemas de manejo do solo**. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 28-40, 2005.

## 9. RESUMO BIOGRÁFICO

Michely Tomazi, filha de Izaura Maria Tomazi e Achilles Tomazi, nasceu no dia 7 de maio de 1978 em Campo Grande (MS). Mudou-se com sua família para o estado de Mato Grosso no município de Santa Rita do Trivelato, onde alfabetizou-se com auxílio de seus pais. Em 1986 ingressou na 2ª série em Realeza (PR), após regressou para Mato Grosso onde cursou da 3ª a 8ª série em Várzea-Grande e o 2ª grau no colégio São Gonçalo em Cuiabá (MT). Em 1997, ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), onde trabalhou em iniciação científica durante três anos, graduando-se no início de 2002. No mesmo ano, ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical da UFMT, com ênfase em solos, sob orientação do Prof. Eduardo Guimarães Couto. Em 2004 concluiu o mestrado e atuou na EMBRAPA Agropecuária Oeste como bolsista DTI no laboratório de microbiologia do solo, coordenado pelo pesquisador Dr. Fábio Martins Mercante. Em março de 2005 ingressou no curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS na área de Manejo de Solos sob orientação do Prof. Cimélio Bayer. Realizou parte do seu doutorado junto ao departamento de Ecologia e Manejo de Ecossistemas na Universidade Técnica de Munique (TUM) sob orientação da Prof. Heike Knicker, de janeiro a maio de 2008.