

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

**ESTOQUE E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO  
EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS  
E ADUBAÇÃO NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

JEFERSON DIEKOW  
Engenheiro Agrônomo (UFSM)  
M.Sc. Ciência do Solo (UFRGS)

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

Porto Alegre (RS) Brasil  
Dezembro de 2003

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO

D559e Diekow, Jeferson  
Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto / Jeferson Diekow. - Porto Alegre : J.Diekow, 2003.

xvii, 164f. : il.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

1. Solo : Matéria orgânica : Sistema de cultura : Adubação nitrogenada : Plantio direto. I.Titulo.

CDD: 631.4

CDU: 631.4

Catalogação na publicação:  
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

JEFERSON DIEKOW  
Engenheiro Agrônomo - UFSM  
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

## TESE

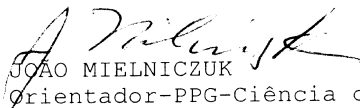
Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

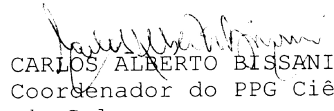
### **DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO**

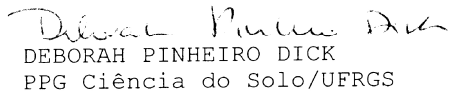
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 11/12/2003  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 19/01/2004  
Por


  
JOAO MIELNICZUK  
Orientador-PPG-Ciência do Solo

  
CARLOS ALBERTO BISSANI  
Coordenador do PPG Ciência  
do Solo

  
DEBORAH PINHEIRO DICK  
PPG Ciência do Solo/UFRGS

  
CARLOS ALBERTO CERETTA  
Departamento de Solos/UFSM

  
CLENIO NAILTO PILLON  
EMBRAPA-CPACT

  
GILMAR ARDUINO B MARODIN  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
**Alfredo e Hedi Diekow,**  
que sempre lutaram  
pela felicidade dos filhos.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Mielniczuk, pela maneira sábia que nos orientou. Pela humildade e simplicidade. Por ensinar que na Ciência do Solo o “enxadao” é tão importante quanto o “espectrômetro”. Por todas as portas que foram abertas. Pelos princípios de vida...

Ao Professor Cimélio Bayer, pelo empenho em nossa co-orientação, pela motivação que contagia à todos e por todos os ganhos obtidos com sua vinda à UFRGS.

À Dra. Heike Knicker, pela excelente supervisão e calorosa acolhida durante o doutorado sanduíche na Technische Universität München, Alemanha.

À Professora Deborah Dick, pelo estímulo constante e auxílio em diversas etapas do trabalho.

Ao PPG Ciência do Solo / UFRGS e seus professores, pela formação acadêmica, pela acolhida durante estes quatro anos.

À CAPES e ao CNPq, pelas bolsas de doutorado, e ao CAPES/DAAD, pela bolsa de doutorado sanduíche.

Às funcionárias Solvejg Roller e Petra Müller e à Dra. Angelika Kölb, da T.U.München, pela valiosa contribuição no trabalho de fracionamento físico, análises elementares e hidrólise ácida.

Ao Dr. Francisco Gonzáles-Vila (CSIC, Espanha) e seus estudantes Oliva Polvillo e José Antonio, por possibilitarem a realização do trabalho de pirólise analítica.

Aos colegas do PPG Ciência do Solo / UFRGS, em especial aos de orientação, Clênio Pillon, Thomé Lovato, Fabiane Vezzani, Flávia Fontana, Lúcio Debarba, Falberni Costa, Juliana Gomes, Frederico Vieira, Nilvania Melo, Júlio Salton, Paulo Cesar Conceição, Gustavo Tornquist, Madalena Boeni, Elisandra Oliveira, Fabiano de Bona, e aos doutorandos e pós-doutorandos da T.U.München, Kerstin Abelmann, Thomas Caspari, Clemens Engelke, Karin Eusterhues, Svetlana Filimonova, Philipp Jaesche, Naima Sabil, Sandra Spielvogel, Cornelia Rumpel, Silke Müller e Ingo Schöning, pela constante troca de idéias e discussão científica, pelo auxílio nas atividades de campo, no laboratório e de diversas outras etapas, pelo crescimento em conjunto.

Aos funcionários do Departamento de Solos da UFRGS, Adão dos Santos, Antônia da Silva, Agostinho de Oliveira, Cintia Medeiros, Denise Schroeder, Jader Amaro, José da Silva (Zé), Luis da Silveira (Tonho), M<sup>a</sup> do Carmo de Oliveira, Márcio Silveira; e aos do Lehrstuhl für Bodenkunde da T.U.München, Gabriele Albert, Maria Asam, Bärbel Angres, Horst Fechter, Josef Ficher e Ulrike Maul, pela presteza em nos auxiliar em diversas etapas de nosso curso.

À Josi, por também auxiliar na elaboração deste trabalho, por tudo o que representa e pela grande companheira que é.

Aos meus pais, Alfredo e Hedi, e à meu irmão, Flavio, pelo amor e apoio constantes e pela harmonia do ambiente familiar.

# ESTOQUE E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS E ADUBAÇÃO NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO <sup>1</sup>

Autor: Jeferson Diekow

Orientador: Prof. João Mielniczuk

Co-Orientador: Prof. Cimélio Bayer

## RESUMO

A matéria orgânica determina os principais atributos que definem a qualidade do solo, sendo diretamente afetada pelas práticas de manejo. Esta pesquisa objetivou ampliar o conhecimento referente às influências do sistema de culturas e da adubação nitrogenada no estoque e na qualidade da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto. O estudo foi desenvolvido a partir de um experimento de longa duração (17 anos), constituído por dez sistemas de culturas em plantio direto e estabelecido num Argissolo inicialmente degradado pelo cultivo. Utilizou-se os sistemas aveia/milho, lablab+milho e guandu+milho, com e sem adubação nitrogenada (N). O tratamento solo descoberto, da área experimental, e o campo nativo também foram incluídos no estudo. Dez camadas de solo foram amostradas até a profundidade de 107,5 cm e três destas (0-2,5; 2,5-7,5 e 37,5-47,5 cm) foram fracionadas fisicamente nas frações matéria orgânica particulada (MOP), silte e argila. Os estoques de C e N foram avaliados em cada camada e também nas frações físicas. A qualidade da matéria orgânica foi investigada por espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C e de RMN-<sup>15</sup>N (estado sólido), hidrólise ácida e pirólise analítica. O estoque de C da camada de 0-107,5 cm reduziu, durante o período experimental, em média 5,8 Mg C ha<sup>-1</sup> nos sistemas solo descoberto e aveia/milho (sem N), permaneceu constante no sistema aveia/milho (com N) e aumentou em média 20,6 Mg C ha<sup>-1</sup> nos sistemas lablab+milho e guandu+milho (sem N e com N). O mesmo ocorreu nos estoques de C e N das frações físicas, sendo que as alterações foram relativamente maiores na MOP. A fração argila apresentou uma capacidade finita de estocar C (47,7 g C kg<sup>-1</sup> de argila). Os sistemas de culturas afetaram a qualidade da MOP, porém não da matéria orgânica das frações silte e argila. A adubação nitrogenada tendeu a aumentar a proporção de C alquil na fração argila. A principal forma de carbono da matéria orgânica do solo foi C O-alquil. Material carbonizado (carvão) foi encontrado na fração silte da camada de 37,5-47,5 cm. O manejo do solo atua principalmente sobre os estoques e não tanto sobre a qualidade da matéria orgânica do solo.

---

<sup>1</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (165 p.) Dezembro, 2003.

# SOIL ORGANIC MATTER STOCK AND QUALITY AS AFFECTED BY NO-TILL CROPPING SYSTEMS AND NITROGEN FERTILISATION <sup>2</sup>

Author: Jeferson Diekow

Advisor: Prof. João Mielniczuk

Co-Advisor: Prof. Cimélio Bayer

## ABSTRACT

The soil organic matter determines the main soil quality parameters, being directly affected by soil management practices. The main objective of this research was to improve knowledge about influences of no-till cropping systems and N fertilisation on soil organic matter stocks and quality. This study was based on a long-term experiment, constituted by ten no-till cropping systems, established on a degraded Acrisol. The oat/maize, lablab+maize and pigeon pea+maize cropping systems, with two N-fertilisation levels (0 and 180 kg N ha<sup>-1</sup>), were employed. The bare soil treatment, of the experimental area, and the native grassland were also included in the study. Ten soil layers were sampled to 107.5-cm depth. Three of them (0-2.5, 2.5-7.5 and 37.5-47.5 cm) were physically fractionated in particulate organic matter (POM), silt- and clay-size fractions. The C and N stocks were assessed for each layer and physical fraction. The organic matter quality was assessed by CPMAS <sup>13</sup>C NMR and <sup>15</sup>N NMR, acid hydrolysis and analytical pyrolysis. During the experimental period, the soil C stock of the 0-107.5 cm layer decreased in average 5.8 Mg C ha<sup>-1</sup> in bare soil and oat/maize (no N), remained constant in oat/maize (with N) and increased in average 20.6 Mg C ha<sup>-1</sup> in lablab+maize and pigeon pea+maize cropping systems (no N and with N). Similar trend occurred for C and N stocks in physical fractions, being the alterations relatively higher in the POM fraction. The clay-size fraction showed a finite capacity to store organic C (47.7 g C kg<sup>-1</sup> clay). Cropping systems affected the POM quality but not the quality of the organic matter in silt- and-clay size fractions. The only effect of N fertilisation was an increase in the alkyl C proportion in clay-size fraction. C O-alkyl was the main carbon form of soil organic matter. Charred material was found in the silt-size fraction of the 37.5-47.5 cm layer. The soil management affects mainly the organic matter stocks, promoting only little changes on the soil organic matter quality.

---

<sup>2</sup> Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (165 p.) December, 2003.

## SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Manejo do solo como um fator determinante dos estoques totais de matéria orgânica do solo .....	5
2.2.1. Perdas de matéria orgânica promovidas pelo cultivo do solo..	5
2.2.2. Fatores que afetam a adição de matéria orgânica no solo sob plantio direto .....	7
2.2.3. O papel das leguminosas nos sistemas de culturas .....	9
2.3. Manejo do solo como um fator determinante do estoque e da qualidade da matéria orgânica de frações do solo .....	11
2.3.1. Princípios gerais do fracionamento da matéria orgânica do solo .....	11
2.3.2. Obtenção de frações orgânicas do solo: ênfase no fracionamento físico .....	13
2.3.3. Frações orgânicas do solo e o índice de manejo de carbono (IMC) .....	15
2.3.4. Manejo do solo e a relação com o estoque de matéria orgânica nas frações físicas .....	17
2.3.5. Técnicas analíticas para avaliação da qualidade da matéria orgânica do solo .....	21
2.3.6. Manejo do solo e a relação com a qualidade química da matéria orgânica .....	27
2.4. Hipótese geral .....	35
2.5. Objetivo geral .....	35
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL</b> .....	36
3.1 Experimento de campo e amostragem de solo e de plantas .....	36
<b>4. ESTUDO I Alterações nos estoques de C e N do solo promovidas por sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto</b> .....	39
4.1. Introdução .....	39
4.2. Material e métodos .....	41
4.2.1. Experimento de campo e coleta de amostras de solo .....	41
4.2.2. Tratamentos e análises realizadas .....	41
4.3. Resultados e discussão .....	43
4.4. Conclusões .....	55



<b>5. ESTUDO II Estoques de C e N em frações físicas do solo definidos por sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto</b> .....	56
5.1. Introdução .....	56
5.2. Material e métodos .....	58
5.2.1. Experimento de campo e coleta de amostras de solo .....	58
5.2.2. Tratamentos avaliados .....	58
5.2.3. Fracionamento físico do solo e análises elementares de C e N .....	58
5.2.4. Microscopia ótica .....	61
5.3. Resultados e discussão .....	62
5.3.1. Estoques de C e N nas frações físicas e índice de manejo de carbono (IMC) .....	62
5.3.2. Perdas e ganhos de C e N nas frações físicas do solo .....	70
5.3.3. Relação C:N das frações físicas .....	72
5.3.4. Capacidade de estoque de matéria orgânica em frações físicas .....	75
5.4. Conclusões .....	78
<b>6. ESTUDO III Qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto</b> .....	79
6.1. Introdução .....	79
6.2. Material e métodos .....	81
6.2.1. Experimento de campo e coleta de amostras .....	81
6.2.2. Tratamentos avaliados e técnicas analíticas empregadas .....	81
6.3. Resultados e discussão .....	87
6.3.1. Composição da parte aérea de plantas .....	87
6.3.2. Qualidade da matéria orgânica do solo .....	90
6.3.2.1. Solo integral .....	90
6.3.2.2. Matéria orgânica particulada (MOP) .....	106
6.3.2.3. Fração silte .....	108
6.3.2.4. Fração argila .....	111
6.3.3. Influência da adubação nitrogenada sobre a qualidade da matéria orgânica .....	115
6.3.4. Variações na qualidade da matéria orgânica entre as frações físicas .....	116
6.4. Conclusões .....	119
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	120
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	122
<b>9. APÊNDICES</b> .....	136
<b>10. RESUMO BIOGRÁFICO</b> .....	165

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
2.1. Principais regiões e sub-regiões espectrais para RMN- <sup>13</sup> C (Knicker & Lüdemann, 1995; Kögel-Knabner, 1997; Kögel-Knabner, 2002) ..	23
2.2. Principais regiões espectrais para RMN- <sup>15</sup> N (Knicker & Lüdemann, 1995; Kögel-Knabner, 1997) .....	23
4.1. Concentração de C orgânico e N total no perfil do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	47
4.2. Acúmulo absoluto e taxa anual de acúmulo de C nas camadas de 0-17,5 cm e 0-107,5 cm do solo dos sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada .....	50
4.3. Relação C:N ao longo do perfil do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	53
5.1. Distribuição do tamanho de partículas em função da dispersão por sonicação (450 J mL <sup>-1</sup> ) e por dispersante químico (NaOH) .....	60
5.2. Recuperação de massa, C e N após o fracionamento físico das amostras .....	62
5.3. Estoque de C total e nas frações físicas, C lábil, índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do carbono (L), índice de labilidade (IL) e índice de manejo de carbono (IMC) na camada de 0-7,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Campo nativo foi considerado como a referência para cálculo do IMC. Os estoques de C correspondem à média ponderada entre as camadas de 0-2,5 e 2,5-7,5 cm .....	69
5.4. Perdas e ganhos absolutos de C e N (g dm <sup>-3</sup> ) nas frações físicas das camadas de 0-2,5, 2,5-7,5, 0-7,5 e 37,5-47,5 cm do solo dos sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada. Valores positivos representam ganhos e valores negativos perdas. Valores entre parênteses representam perdas e ganhos relativos (%) .....	71
5.5. Relação C:N das frações físicas do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	73
5.6. Concentração de C e N e relação C:N da parte aérea da vegetação do campo nativo e das plantas de cobertura e de milho .	74

6.1.	Amostras de solo e de frações físicas avaliadas pelas diferentes técnicas analíticas. $^{13}\text{C}$ = RMN- $^{13}\text{C}$ CPMAS; $^{15}\text{N}$ = RMN- $^{15}\text{N}$ CPMAS; Hid = hidrólise ácida; Pir = pirólise analítica .....	81
6.2.	Relação C:N e recuperação de massa, C e N das amostras tratadas com ácido fluorídrico (HF) 10% .....	83
6.3.	Parâmetros específicos empregados na espectroscopia RMN- $^{13}\text{C}$ CPMAS de diferentes tipos de amostra .....	84
6.4.	Proporção de diferentes tipos de C presentes na parte aérea da vegetação do campo nativo e de plantas de cobertura e de milho em sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN- $^{13}\text{C}$ .....	87
6.5.	Formas de N orgânico do solo integral (0-2,5 e 2,5-7,5 cm) e da fração física argila (0-2,5 cm) do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados obtidos através de hidrólise ácida com HCl 6 mol L <sup>-1</sup> .....	92
6.6.	Identificação dos picos nos pirogramas obtidos por pirólise analítica (Py-GC/MS) <sup>1/</sup> .....	98

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
4.1. Estoques de C (a, b) e N (c, d) nas camadas de 0-17,5 cm (a, c) e 0-107,5 cm (b, d) do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Letras maiúsculas comparam os diferentes sistemas de culturas (sem N) e letras minúsculas comparam os diferentes níveis de adubação nitrogenada (nos sistemas AV/MI, LB+MI e GD+MI), através do teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Para comparar o efeito da adubação nitrogenada nos estoques de N do solo, usou-se $P < 0,10$ . * Dado obtido a partir de Teixeira (1988) .....	44
4.2. Relação C:N média de todos os tratamentos (com e sem N) e teor médio de argila ao longo do perfil do solo .....	54
5.1. Esquema do fracionamento físico das amostras de solo .....	59
5.2. Estoques de C (a,b,c) e N (d,e,f) nas frações físicas MOP, silte e argila nas camadas de 0-2,5 cm (a,d), 2,5-7,5 cm (b,e) e 37,5-47,5 cm (e,f) do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Barras de erro correspondem ao desvio padrão .....	63
5.3. Micrografia da fração tamanho silte da camada de 0-2,5 cm do sistema de culturas GD+MI (sem N). pl = fragmentos de planta; hi = fragmentos de hifas .....	66
5.4. Distribuição do estoque total de C (a,b,c) e N (d,e,f) nas frações físicas MOP, silte e argila das camadas de 0-2,5 cm (a,d), 2,5-7,5 cm (b,e) e 37,5-47,5 cm (c,f) do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	68
5.5. Relação entre os estoques de C (a,b) e de N (c,d) das frações físicas e os respectivos estoques totais nas camadas de 0-2,5 (a,c) e 2,5-7,5 cm (b,d) do solo .....	76
6.1. Espectros de RMN- <sup>13</sup> C CPMAS da parte aérea da vegetação do campo nativo e de plantas de cobertura e de milho em sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	89
6.2. Proporção de diferentes tipos de C presentes no solo integral (a) e nas frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN- <sup>13</sup> C CPMAS .....	91

6.3.	Espectros de RMN- <sup>15</sup> N CPMAS do solo integral da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. As amostras foram tratadas com HF 10% .....	94
6.4.	Espectros de RMN- <sup>13</sup> C CPMAS do solo integral (a) e das frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	96
6.5.	Pirogramas do solo integral da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de pirólise analítica (Py-GC/MS). Os possíveis compostos (fragmentos de pirólise) que os picos enumerados representam estão listados na Tabela 6.6 e os respectivos espectros de massa no Apêndice 25 .....	97
6.6.	Pirogramas da fração física MOP da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de pirólise analítica (Py-GC/MS). Os possíveis compostos (fragmentos de pirólise) que os picos enumerados representam estão listados na Tabela 6.6 e os respectivos espectros de massa no Apêndice 25 .....	99
6.7.	Proporção de diferentes tipos de C presentes no solo integral (a) e nas frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 2,5-7,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN-C <sup>13</sup> CPMAS .....	102
6.8.	Espectros de RMN- <sup>13</sup> C CPMAS do solo integral (a) e das frações MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 2,5-7,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	103
6.9.	Proporção de diferentes tipos de C presentes no solo integral (a) e nas frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 37,5-47,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN-C <sup>13</sup> CPMAS. n.d. = não determinado devido a quantidade insuficiente de amostra .....	104
6.10.	Espectros de RMN- <sup>13</sup> C CPMAS do solo integral (a) e das frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 37,5-47,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	105
6.11.	Micrografia da fração silte do sistema GD+MI (sem N) da camada de 37,5-47,5 cm. Os demais tratamentos apresentaram micrografias muito semelhantes a esta .....	110

- 6.12. Pirogramas da fração argila da camada de 0-2,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de pirólise analítica (Py-GC/MS). Os possíveis compostos (fragmentos de pirólise) que os picos enumerados representam estão listados na Tabela 6.6 e os respectivos espectros de massa no Apêndice 25 ..... 112
- 6.13. Proporção média dos diferentes tipos de C na parte aérea de plantas e nas frações físicas das duas camadas superficiais de solo de todos os tratamentos. Dados obtidos por RMN-C<sup>13</sup> CPMAS 117

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Dados originais de concentração de C e N ( $\text{g kg}^{-1}$ ), relação C:N e densidade do solo de cada camada de cada tratamento .....	137
2. Quadro da análise de variância da concentração de C ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas ...	140
3. Quadro da análise de variância da concentração de N ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas ..	140
4. Quadro da análise de variância da relação C:N das amostras de solo, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	141
5. Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados .....	141
6. Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados .....	141
7. Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados .....	142
8. Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados .....	142
9. Quadro da análise de variância da concentração de C ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	143

10.	Quadro da análise de variância da concentração de N ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	143
11.	Quadro da análise de variância da relação C:N das amostras de solo, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	144
12.	Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	144
13.	Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	145
14.	Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	145
15.	Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas .....	146
16.	Relação entre os resultados obtidos por diferentes métodos de análise de C orgânico total (COT) e N total do solo. a) COT por Walkley Black versus combustão seca (analisador Vario EL); b) N total por Kjeldahl versus Dumas (analisador Vario EL); c) relação C:N por Walkley Black e Kjeldahl versus combustão seca e Dumas (analisador Vario EL) .....	147
17.	Equações logarítmicas de distribuição granulométrica empregadas para estimativa do teor de argila das camadas de solo. A variável x refere-se ao tamanho de partícula, em $\mu\text{m}$ ; y refere-se a proporção de partículas com tamanho $< x \mu\text{m}$ .....	148
18.	Teores de argila, silte e areia das camadas de solo .....	149



19.	Proporção de massa recuperada após o fracionamento físico e dados originais de concentração de C e N, obtidos com analisador Vario EL, e relação C:N das frações físicas do solo .....	150
20.	Proporção dos diferentes tipos de C na parte aérea da vegetação do campo nativo e das plantas dos sistemas de culturas .....	154
21.	Proporção dos diferentes tipos de C no solo integral e nas frações físicas da camada de 0-2,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	155
22.	Proporção dos diferentes tipos de C no solo integral e nas frações físicas da camada de 2,5-7,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	156
23.	Proporção dos diferentes tipos de C no solo e nas frações físicas da camada de 37,5-47,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada .....	157
24.	Dados originais dos valores de massa hidrolisável, N-aminoácido e N-não hidrolisável, obtidos por hidrólise ácida .....	158
25.	Espectros de massa dos correspondentes picos obtidos por pirólise analítica .....	159

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A matéria orgânica do solo (MOS) é um importante componente do ciclo terrestre do C e está intimamente relacionada com o funcionamento normal deste na natureza. Dessa forma, manter ou incrementar o estoque de MOS são requisitos fundamentais para garantir a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema agrícola.

O manejo adequado do solo propicia a manutenção ou o incremento dos estoques de MOS por meio de sistemas de preparo que minimizem o revolvimento do solo e de sistemas de culturas que maximizem a adição de resíduos. É positivo o fato de que aproximadamente 20 milhões de hectares no Brasil já estejam sendo cultivados sob o sistema plantio direto. Entretanto, o desafio atual é estabelecer sistemas de culturas que garantam tanto a cobertura do solo como a adição satisfatória de resíduos. A adição de resíduos depende também de outros fatores, entre os quais salienta-se a adubação nitrogenada, principalmente em sistemas de culturas constituídos exclusivamente por espécies gramíneas.

O sistema de culturas deve atender ao requisito de adicionar satisfatória quantidade de resíduo por área e por tempo no solo. Numa condição ideal, isso significa cultivar o solo o ano inteiro com plantas de elevada produção de fitomassa. Geralmente gramíneas e leguminosas são as principais famílias de plantas utilizadas em sistemas de culturas. O grande benefício das leguminosas é o fornecimento de N ao solo através do processo de fixação biológica de  $N_2$  atmosférico e, no caso específico das espécies tropicais de ciclo estival, como guandu, lablab, crotalária, mucuna e outras, a elevada produção de fitomassa é um benefício adicional.

Desde a instalação dos primeiros experimentos de longa duração na região Sul do Brasil, muitas informações foram obtidas com relação aos

estoques de MOS em função de sistemas de culturas adotados no plantio direto. Entretanto, ainda faz-se necessário complementar tais informações com outras que abordem também a influência da adubação nitrogenada e que considerem os estoques de matéria orgânica nas camadas subsuperficiais do solo (abaixo dos 20-30 cm de profundidade), pouco investigadas até o momento.

Tão importante quanto conhecer a influência do sistema de culturas e da adubação nitrogenada sobre o estoque total de MOS, é também conhecer a influência destes sobre o estoque e a qualidade da matéria orgânica nas frações físicas do solo. Diferentes frações físicas, como matéria orgânica particulada (MOP) e associada aos minerais, possuem diferentes aspectos funcionais e composicionais, nem sempre percebidos numa avaliação do solo integral. A combinação do fracionamento físico do solo com o emprego de técnicas analíticas como espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C e de RMN-<sup>15</sup>N, hidrólise ácida e pirólise analítica permite a obtenção de informações mais amplas sobre alguns aspectos básicos da dinâmica da MOS, como sua decomposição, estabilização, funcionalidade, estrutura, etc.

O estudo da MOS baseado em métodos de fracionamento físico, em substituição aos métodos químicos convencionais, é relativamente recente na Ciência do Solo. Especificamente na região Sul do Brasil, apesar de já existirem trabalhos científicos de grande relevância, o conhecimento de como o manejo do solo interfere no estoque e na qualidade da matéria orgânica das frações físicas ainda precisa ser aprofundado, o que certamente trará subsídios para um melhor entendimento da dinâmica da matéria orgânica do solo como um todo.

A hipótese geral é que no sistema plantio direto o estoque de matéria orgânica do solo e das frações físicas depende do sistema de culturas e da adubação nitrogenada, visto que esses fatores determinam a adição de resíduos vegetais ao solo. Entretanto, a qualidade da matéria orgânica do solo e das frações físicas é independente de tais fatores, exceto para a MOP, que, por ser constituída basicamente de resíduo de plantas, tem sua qualidade afetada pelo sistema de culturas.

O objetivo geral deste trabalho foi ampliar o conhecimento referente as influências do sistema de culturas e da adubação nitrogenada sobre o estoque e a qualidade da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto.

A presente tese está estruturada em sete capítulos, sendo que a revisão bibliográfica, com informações teóricas sobre o tema, e o item Material e Métodos Geral, com descrição do experimento e dos procedimentos de amostragem, constam nos Capítulos 2 e 3, respectivamente. A apresentação e discussão dos resultados foram divididos em três estudos, nos quais são apresentadas as hipóteses, objetivos e metodologias específicas. O Estudo I trata sobre o estoque total e taxas de acúmulo de C e N no solo e é descrito no Capítulo 4. No Capítulo 5 é apresentado o Estudo II, que trata sobre o estoque de C e N nas frações físicas. A qualidade da matéria orgânica, tanto do solo integral como das frações físicas é o tema do Estudo III, que consta no Capítulo 6. A discussão conjunta dos resultados e considerações finais são apresentadas no Capítulo 7.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Introdução**

A história do manejo do solo se confunde com a história da Agricultura e numa análise mais profunda com a história das civilizações. Ao longo deste período foi descoberta a importância do “húmus” para a produção agrícola e de que este componente do solo era diretamente afetado pelas práticas de manejo adotadas pelo Homem. Significativos avanços no entendimento da dinâmica do “humus” foram obtidos a partir do surgimento e desenvolvimento da Química Agrícola e da Ciência do Solo, no século XIX. Porém até hoje a dinâmica e a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e os fatores que as controlam, entre eles o manejo do solo, são importantes temas de pesquisa e que parecem continuamente estabelecer desafios para o futuro.

Até a primeira metade do século XIX, o estudo da MOS estava confinado a um trabalho de investigação em laboratório. Talvez seja de J.B. Lawes e J.H. Gilbert o mérito de pela primeira vez estabelecer estudos científicos de campo relacionando matéria orgânica com manejo do solo, embora os pesquisadores não pensaram especificamente nisso quando instalaram em 1843 os primeiros experimentos na Estação Experimental de Rothamsted (Johnston, 1994). Pode-se afirmar que foi V.V. Dokuchaev, em 1883, quem pela primeira vez abstraiu teoricamente que a matéria orgânica, como um constituinte do solo, era resultante de fatores de formação, entre os quais a ação do Homem através do manejo do solo (Kononova, 1966).

Os estudos da MOS também foram impulsionados a partir de 1920 nos Estados Unidos, onde o cultivo agrícola estava reduzindo os estoques de matéria orgânica e promovendo severa degradação do solo (Russel, 1929), de forma que medidas para contornar tais problemas precisavam ser adotadas.

Entre as primeiras medidas práticas que foram adotadas, destacam-se os sistemas de manejo com preparo reduzido do solo, que posteriormente evoluíram para o sistema sem preparo, referido como “no-tillage” (Falkner, 1945; Phillips & Young, 1973).

No Brasil, mais especificamente nas áreas produtoras de grãos da região Sul, o processo foi semelhante, porém ocorreu mais tarde. Problemas graves de degradação física do solo causados pelo manejo inadequado, como queima dos restos culturais e preparo excessivo do solo, marcavam o cenário de áreas agrícolas no final da década de 70 e início da década de 80 (Mielniczuk, 1999). O Projeto Integrado de Uso e Conservação do Solo (PIUCS), no Rio Grande do Sul, e o Paraná Rural, no Paraná, preconizavam a adoção de sistemas de preparo reduzido do solo e plantio direto, bem como o cultivo de plantas de cobertura do solo, como formas de contornar tais problemas. Seus resultados foram excelentes em termos de conservação do solo e estabilidade da produção agrícola (Mielniczuk et al., 1983; Mielniczuk et al., 2003).

Na atualidade, um dos desafios da pesquisa em manejo do solo é procurar entender como práticas adequadas de manejo, como o plantio direto, preconizadas por tais programas para resolver os problemas de degradação do solo, afetam os aspectos quantitativos e qualitativos da MOS e como isso afeta as propriedades emergentes que definem a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema de produção agrícola. Nesse sentido, o objetivo desta revisão é organizar algumas idéias e conhecimentos referentes a relação entre o manejo do solo, mais especificamente sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto, e os estoques e a qualidade da matéria orgânica do solo.

## **2.2. Manejo do solo como um fator determinante dos estoques totais de matéria orgânica do solo**

### **2.2.1. Perdas de matéria orgânica promovidas pelo cultivo do solo**

Os estoques de C e N em solos sob vegetação nativa encontram-se em estado estável, de maneira que a quantidade de material orgânico que entra no solo através da adição de resíduos superficiais e radiculares de

plantas é a mesma que sai através da mineralização promovida por microrganismos (Sanchez, 1976). No entanto, quando o fluxo de entrada ou de saída de material orgânico for modificado, o sistema tende a um novo estado estável, com maior ou menor estoque de matéria orgânica, dependendo do tipo de modificação promovida nos fluxos.

O cultivo de solos inicialmente em estado estável sob vegetação de campo, cerrado ou floresta, na maioria das vezes, diminui os estoques originais de C e N. A preocupação com essa diminuição dos estoques de C no solo em função de cultivos levou pesquisadores franceses (Hénin & Dupuis, 1945) a desenvolverem um modelo para explicar a dinâmica dos estoques deste elemento ao longo do tempo de cultivo agrícola:

$$C_t = C_0 e^{-k_2 t} + A k_1 / k_2 [1 - e^{-k_2 t}]$$

Trata-se de um modelo uni-compartimental, que expressa a quantidade de carbono no solo ( $C_t$ ) num tempo  $t$ , onde  $C_0$  = estoque original de carbono no solo,  $A$  = adição anual de resíduos vegetais,  $k_1$  = taxa de conversão dos resíduos vegetais em MOS (coeficiente isohúmico),  $k_2$  = taxa de mineralização da MOS.

Derivando-se a função, obtém-se:

$$dC / dt = k_1 A - k_2 C ,$$

que expressa a variação da quantidade de C no solo num dado intervalo de tempo (em termos práticos geralmente se considera um ano). Este modelo também é usado para explicar a dinâmica dos estoques de N no solo (Woodruff, 1949).

O manejo do solo determina principalmente o valor de dois componentes do modelo:  $k_2$  e  $A$ . O método de preparo do solo afeta a taxa de mineralização  $k_2$ , onde quanto maior a intensidade de revolvimento do solo, maior é a desagregação deste, menor é a eficiência do mecanismo de proteção física da matéria orgânica, maior é a disponibilidade de  $O_2$  para os processos oxidativos de mineralização e conseqüentemente maior é a perda de MOS. Nas condições de um Argissolo Vermelho franco-argilo-arenoso, Bayer (1996)

estimou um  $k_2$  de  $0,054 \text{ ano}^{-1}$  para o preparo convencional do solo, enquanto que para o sistema sem revolvimento (plantio direto) o  $k_2$  estimado foi  $0,029 \text{ ano}^{-1}$ . Porém, cabe ressaltar que essa taxa de mineralização da matéria orgânica também depende da textura do solo, visto que em solos argilosos a proteção física promovida por microagregados não é afetada de forma expressiva pelo preparo (Bayer, 1996; Feller & Beare, 1997). Conseqüentemente as perdas de matéria orgânica ao longo do tempo de cultivo são bem menores em solos argilosos em relação aos arenosos (Dalal & Mayer, 1986). Isso também foi demonstrado em solos sob preparo convencional na região do Cerrado do Oeste Baiano, onde o valor de  $k_2$  foi  $0,24 \text{ ano}^{-1}$  num Latossolo Vermelho franco-argilo-arenoso e  $0,32 \text{ ano}^{-1}$  num Neossolo Quartzarênico (Silva et al., 1994).

Por sua vez, a componente de adição "A" é afetada pela produção de fitomassa, geralmente menor nos cultivos agrícolas em relação àquela da vegetação nativa, o que conseqüentemente diminui o estoque original de MOS. Maiores detalhes sobre o componente de adição "A" são discutidos no item a seguir.

### **2.2.2. Fatores que afetam a adição de matéria orgânica no solo sob plantio direto**

Considerando que a taxa de mineralização  $k_2$  seja constante, a adição de resíduos vegetais pelos sistemas de culturas é a principal variável que define os estoques de matéria orgânica em solos sob plantio direto. A quantidade inicial de resíduo produzida pelo sistema de culturas depende de fatores bióticos (ex.: espécie vegetal) e abióticos (ex.: clima, adubação nitrogenada, tipo de solo, etc.). Os sistemas de culturas adaptados a produção de grãos são constituídos geralmente por dois grupos de plantas: as de importância econômica, cujo objetivo é a própria produção de grãos, como por exemplo milho, soja, arroz, trigo, etc, e as plantas de cobertura, cultivadas em consórcio ou em sucessão com as primeiras, objetivando manter a cobertura do solo (vegetal ou morta), promover a adubação verde (adição e reciclagem de nutrientes), melhorar a estrutura do solo, etc (Monegat, 1991; Calegari et al., 1992). Quando o objetivo é incrementar o estoque de MOS através da adição de resíduos, plantas de importância econômica, como o milho, e plantas de



cobertura do solo, com elevada produção de fitomassa, passam a ter um papel essencial dentro dos sistemas de culturas.

A importância da produção de fitomassa dos sistemas de culturas na definição dos estoques de C e N do solo manejado sob plantio direto foi demonstrada por Bayer (1996), através do emprego do modelo proposto por Hénin & Dupuis (1945). Para o solo descoberto, com adição anual de 0,66 Mg C ha<sup>-1</sup> via resíduo vegetal de plantas espontâneas, foi estimado que após uma perda de 22,55 Mg C ha<sup>-1</sup> desde o início da adoção deste manejo, o estoque de C na camada de 0-17,5 cm do solo se estabilizaria em 10 Mg ha<sup>-1</sup>. Isso demonstra que simplesmente eliminar o preparo do solo, sem levar em consideração a adoção de sistemas de culturas com satisfatória adição de resíduos, não é a solução para eliminar as perdas de C do solo. Porém, no sistema de culturas guandu+milho, com adição de 8,89 Mg C ha<sup>-1</sup>, o estoque estável de C nessa camada foi estimado em 61,38 Mg ha<sup>-1</sup>, representando um acúmulo de 28,83 Mg C ha<sup>-1</sup> em relação ao estoque no início deste manejo. Por outro lado, a sucessão aveia/milho, com adição intermediária de 4,37 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> tendeu a manter os níveis originais de C do solo.

A quantidade de resíduo vegetal adicionada ao solo também depende de outros fatores relacionados com o manejo, onde salienta-se a adubação nitrogenada. Incremento de 240% na produção de fitomassa da parte aérea de plantas de milho, no sistema de culturas aveia/milho, foi obtido por Testa (1989), em função da aplicação de 120 kg N ha<sup>-1</sup>. No mesmo trabalho, este rendimento foi 41% e 36% superior nos sistemas lablab+milho e guandu+milho, respectivamente. Em outro estudo, a aplicação de 180 kg N ha<sup>-1</sup> na cultura do milho aumentou em 92% a quantidade de C adicionada ao solo via resíduo vegetal desta espécie no sistema aveia/milho e, em média, 38% nos sistemas com leguminosas (vica/milho e aveia+vica/milho+caupi) (Lovato, 2001). Após 13 anos de plantio direto, o estoque de C nos sistemas aveia/milho e aveia+vica/milho+caupi foi, respectivamente, em torno de 7% e 5% superior no tratamento que recebeu adubação nitrogenada em relação ao tratamento sem N (Lovato, 2001). Tais resultados ressaltam a importância da adubação nitrogenada em aumentar a adição de resíduos ao solo e, por conseguinte, os estoques de C e N, principalmente em sistemas constituídos unicamente por gramíneas. Outros estudos em condições de clima temperado também relatam

incrementos nos estoques de C e N do solo em função da adubação nitrogenada (Campbell et al., 1991a; Campbell et al., 1996), porém em solos onde os estoques originais de matéria orgânica já eram elevados, como no caso de alguns Chernossolos, tais incrementos foram praticamente nulos (Campbell et al, 1991b).

Além da quantidade inicial de resíduos vegetais adicionada ao solo, a quantidade de material orgânico realmente incorporada aos estoques da MOS depende também do coeficiente de conversão  $k_1$ . Em cultivos de cana de açúcar, Cerri (1986) obteve um valor  $k_1$  de 0,20. No entanto, convém considerar que tal valor pode variar, principalmente em função de dois fatores, segundo informações de Balesdent & Balabane (1996) e Bolinder et al. (1999). O primeiro fator refere-se as características intrínsecas do resíduo, como o grau de recalcitrância, expresso pela relação lignina/N, onde a maior concentração de lignina aumenta a resistência do material a decomposição e assim eleva o valor de  $k_1$ . O segundo fator refere-se a acessibilidade da microbiota ao resíduo, onde é importante destacar as diferenças de  $k_1$  entre o resíduo da parte aérea de plantas e o resíduo de raízes. No caso de plantas de milho, os resíduos de raízes possuem  $k_1$  maior (17%) que resíduos da parte aérea (média 12,2%) (Bolinder et al., 1999), possivelmente por serem depositados diretamente no interior do solo e estarem protegidos fisicamente pelos agregados. Outra explicação pode ser o fato de que raízes possuem maior relação lignina/N que a parte aérea.

### **2.2.3. O papel das leguminosas nos sistemas de culturas**

Na Antigüidade (Grécia) já se conheciam as vantagens das leguminosas em aumentar o rendimento agrícola de espécies não leguminosas (Tisdale et al., 1993). Mais tarde foi descoberto que esse incremento de rendimento era devido a maior disponibilidade de N, promovida através da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Ainda hoje a grande razão da inclusão de leguminosas nos sistemas de culturas é o aumento que elas promovem na disponibilidade de N aos cultivos em sucessão ou em consórcio.

Espécies leguminosas participam do processo de FBN através da simbiose que estabelecem com bactérias diazotróficas (Paul & Clark, 1996), as quais, por possuírem a enzima nitrogenase, são capazes de reduzir  $N_2$

atmosférico à forma amina (-NH<sub>2</sub>), que é incorporada a compostos orgânicos através de determinadas rotas bioquímicas. Quando o tecido vegetal entra em senescência, os microrganismos heterotróficos mineralizam o N-NH<sub>2</sub> para N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, o qual, junto com seu produto de nitrificação (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), constituem as formas de N disponíveis para as plantas.

No entanto, nem todo o N mineralizado a partir do resíduo de leguminosas pode ser considerado como disponível aos cultivos associados, visto haver a necessidade de um sincronismo entre a mineralização do resíduo e a demanda de N pelas plantas, o que nem sempre ocorre. Mas apesar disso, se tem registros de significativas contribuições de N por leguminosas, como por exemplo o fornecimento de 40 a 90 kg N ha<sup>-1</sup> ao milho em sucessão à ervilhaca (*Vicia sativa*) (Amado, 1997; Pons et al., 1984). Este fato resulta numa considerável redução de custos de produção, já que a necessidade de N fertilizante é significativamente menor (Amado, 1997).

Além de incrementar a produção de grãos, espécies leguminosas também promovem aumentos nos estoques de matéria orgânica do solo. Num estudo conduzido por Lovato (2001), o sistema de culturas vica/milho apresentou um estoque de C 7,5% maior em relação ao sistema aveia/milho, ambos sem N, na camada de 0-17,5 cm. Nesse caso, a contribuição de N pelas leguminosas incrementou a produção de fitomassa, que foi de 3,4 Mg C ha<sup>-1</sup> no sistema vica/milho em comparação aos 2,2 Mg C ha<sup>-1</sup> no sistema aveia/milho.

Entre as espécies leguminosas, vale destacar também as de ciclo estival (verão), caracterizadas pela elevada capacidade de produção de fitomassa e adaptação em ambientes tropicais e subtropicais. No Sul do Brasil elas são geralmente introduzidas nos sistemas de culturas através do consórcio com milho, onde destacam-se várias espécies, entre as quais o guandú (*Cajanus cajan*) e lablab (*Lablab purpureum*), avaliadas nesta tese. O guandu é uma espécie arbustiva, de ciclo anual, bianual ou semi-perene (quando podada anualmente), originária da Índia e África tropical ocidental, conforme citado por Calegari et al. (1992). O lablab é uma espécie de planta trepadeira, de ciclo anual ou bianual, originária da África e que se expandiu para a Índia, conforme citação de Calegari et al. (1992). Ambas espécies, além de aumentar a disponibilidade de N aos cultivos, possuem um grande potencial em aumentar os estoques de MOS, tanto através da adição de resíduos

vegetais da própria leguminosa como das espécies gramíneas cultivadas em sucessão ou consórcio.

### **2.3. Manejo do solo como um fator determinante do estoque e da qualidade da matéria orgânica de frações do solo**

#### **2.3.1. Princípios gerais do fracionamento da matéria orgânica do solo**

A matéria orgânica do solo possui uma dinâmica e uma composição extremamente complexa, de forma que entendê-las a partir do solo como um todo, embora necessário sob o ponto de vista da teoria da complexidade, que busca explicar os fenômenos da Natureza de uma forma integrada (Vezzani, 2001), é um processo ainda extremamente difícil de ser realizado, em virtude dos paradigmas que a investigação científica da matéria orgânica do solo segue atualmente. Por isso, como ocorre desde os primórdios dos estudos de matéria orgânica do solo, esta é separada em diferentes frações, que são investigadas detalhadamente e separadamente para fornecer resultados que possam explicar a dinâmica e a composição complexa do todo.

As frações orgânicas do solo podem ser arbitrariamente estabelecidas com base em critérios de localização, composição química ou grau de estabilidade do material orgânico (Stevenson & Elliott, 1989; Baldock & Nelson, 2000). É importante ressaltar que tais frações não possuem materiais orgânicos com características homogêneas e definidas, mas sim materiais orgânicos cujas características variam ao longo de um *continuum* estabelecido entre dois limites extremos que definem a fração (Baldock & Skjemstad, 2000). Segundo informações obtidas de Greenland (1965a, 1965b), Stevenson & Elliott (1989), Stevenson (1994), Christensen (1996) e Baldock & Nelson (2000), a MOS poderia ser fracionada com base nos seguintes critérios.

#### **a) Frações com base na localização da matéria orgânica**

- *Matéria orgânica particulada (MOP)*: são partículas derivadas do resíduo de plantas e hifas que ainda apresentam estruturas celulares reconhecíveis, cuja permanência no solo está condicionada a proteção física desempenhada por agregados. Pode ser classificada como livre ou oclusa,

dependendo se está dentro ou entre os agregados do solo (Golchin et al., 1994).

- *Matéria orgânica associada com minerais*: é a porção da MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organo-minerais (Christensen, 1996), e está protegida através do mecanismo de proteção coloidal.
- *Matéria orgânica dissolvida*: é a fração orgânica solúvel em água, que se encontra na solução do solo e por definição possui tamanho  $< 0,45 \mu\text{m}$ .
- *Matéria orgânica inerte*: constituída principalmente de material carbonizado (carvão), oriundo da queima da vegetação. Poderia ser classificada como MOP, porém não possui estruturas celulares.
- *Biomassa*: corresponde aos organismos vivos do solo.

#### b) Frações com base na composição química da matéria orgânica

- *Biomoléculas*: compostos de estrutura molecular definida. Os principais grupos são:
  - . carboidratos: celulose e hemicelulose, derivadas de resíduo de plantas, e amino-açúcares, derivados tanto de resíduo de plantas como de microrganismos.
  - . lignina: compostos fenólicos, derivados da parede celular de plantas.
  - . compostos proteicos: proteínas, peptídios e aminoácidos derivados de resíduo de plantas e microrganismos.
  - . lipídios: ácidos graxos, oriundos de resíduo de plantas e microrganismos, e ceras, cutina e suberina, derivadas basicamente de resíduo de plantas.
- *Substâncias húmicas*: compostos de estrutura molecular complexa que são formados a partir da reação de quinonas, derivadas de resíduo de plantas e microrganismos, com grupos amino ( $-\text{NH}_2$ ), segundo a teoria dos polifenóis (Stevenson, 1994). Entretanto, existem controvérsias com relação a natureza das substâncias húmicas, de forma que contrapondo a teoria dos polifenóis está a teoria de que substâncias húmicas são formadas a partir de uma complexa mistura de compostos orgânicos de origem vegetal e microbiana em diferentes graus de decomposição (biomoléculas) (Burdon, 2001), organizada na forma de estruturas supra-moleculares (Piccolo, 2001).

### c) Frações com base no grau de estabilidade da matéria orgânica

A partir da combinação das frações baseadas na localização com as frações baseadas na composição química, pode-se estabelecer um terceiro grupo de frações orgânicas, com base no grau de estabilidade que estas possuem ao ataque microbiano (Baldock & Skjemstad, 2000). De forma simplificada, duas frações podem ser estabelecidas: lábil e estável. A primeira é mais propensa ao ataque microbiano que a segunda, pois sua localização física e sua composição química permitem isso, como por exemplo a celulose localizada na MOP. Um exemplo de fração estável seriam as substâncias húmicas associadas com minerais, onde além da recalcitrância molecular desses compostos, também estaria atuando a proteção coloidal. De forma mais complexa, cinco frações podem ser estabelecidas (Parton et al., 1987), onde o grau de estabilidade de cada fração é expresso pelo seu tempo de meia vida ( $t/2$ ). Assim, tem-se:

- *Compartimento estrutural* ( $t/2 = 3$  anos): biomoléculas (celulose, hemicelulose e lignina) presentes principalmente na MOP e resíduo superficial.
- *Compartimento metabólico* ( $t/2 = 0,5$  ano): biomoléculas (proteínas, lipídios, amido e ácidos nucleicos), também presentes na MOP e no resíduo superficial.
- *Compartimento ativo* ( $t/2 = 1,5$  anos): biomoléculas constituintes de estruturas celulares e metabólitos da biomassa microbiana.
- *Compartimento lento* ( $t/2 = 25$  anos): biomoléculas associadas com minerais; biomoléculas da MOP protegida por microagregados.
- *Compartimento passivo* ( $t/2 = 1000$  anos): substâncias húmicas associadas com minerais de argila e protegidas fisicamente.

### **2.3.2. Obtenção de frações orgânicas do solo: ênfase no fracionamento físico**

Todas as frações anteriormente apresentadas foram arbitrariamente estabelecidas em termos teóricos, com base num critério (localização, composição química ou grau de estabilidade). Entretanto, obter tais frações em termos práticos, com base num método de fracionamento (solubilidade em

meio ácido ou alcalino, tamanho de partículas, densidade de partículas, etc.), é um outro processo, onde nem sempre é possível se obter exatamente a fração estabelecida com base nos critérios teóricos.

Tradicionalmente, desde Achard (1786) (citado por Kononova, 1966), tem-se empregado o método de fracionamento com base na solubilidade do material orgânico em meio ácido ou alcalino, chamado de método de fracionamento químico (Stevenson & Elliott, 1989). Nesse, a matéria orgânica é previamente extraída do solo, geralmente com extratores a base de NaOH ou  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ . A fração não extraível é denominada de *humina*, enquanto que o material do extrato é fracionado em *ácido húmico*, que corresponde a fração solúvel em meio alcalino e insolúvel em meio ácido, e em *ácido fúlvico*, que corresponde a fração solúvel tanto em meio alcalino como ácido. Entretanto, este método de fracionamento tem sofrido críticas pelo fato de suas frações não se identificarem com aquelas estabelecidas em termos teóricos, não possuindo portanto muito significado para elucidar a natureza e as funções da matéria orgânica (Stevenson & Elliott, 1989; Hayes & Clapp, 2001).

Como uma forma de contornar tais limitações do fracionamento químico, foi desenvolvido o método de fracionamento físico, com base nos trabalhos pioneiros de Greenland (1965a, 1965b), Edwards & Bremner (1967) e Ford et al. (1969). Um significativo avanço no desenvolvimento desse método foi o emprego da sonicação na dispersão de amostras (Watson, 1971), pois com isso o problema de ataque a matéria orgânica pelo uso de dispersantes químicos estava superado. O fracionamento físico é constituído basicamente de duas etapas: dispersão e separação. A dispersão é obtida através de agitação mecânica ou, como geralmente é feito, através de vibrações produzidas por ultra-som numa suspensão água-solo. Pelo processo de cavitação gerado pela sonda de ultra-som, formam-se bolhas microscópicas de ar que se rompem ao colidir com os agregados de solo, liberando energia para a dispersão dos mesmos em partículas discretas de matéria orgânica particulada e complexos organo-minerais. Entretanto, convém salientar que no caso de alguns solos muito argilosos, a sonicação nem sempre possibilita o rompimento de todos os microagregados em complexos organo-minerais, a

não ser que uma quantidade muito elevada de energia seja aplicada (Feller & Beare, 1997).

A separação das partículas dispersas é baseada na sua densidade, no tamanho ou em ambas características. Na separação por densidade (método densimétrico), as partículas são imersas geralmente em soluções salinas de politungstato de sódio [ $\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40})\cdot\text{H}_2\text{O}$ ] ou iodeto de sódio [NaI] com densidades que variam geralmente entre 1,6 e 2,0  $\text{Mg m}^{-3}$ . O material que flutuar corresponde a matéria orgânica particulada leve (MOP leve), enquanto que o material pesado corresponde aos complexos organo-minerais, onde se encontra a matéria orgânica associada com minerais.

Na separação por tamanho de partícula (método granulométrico), emprega-se geralmente a peneiração e a sedimentação. A fração granulométrica de tamanho areia é separada por peneiração úmida (50 ou 20  $\mu\text{m}$ ) e é constituída por complexos organo-minerais com baixa concentração de C e por matéria orgânica particulada grosseira (MOP grosseira). As frações granulométricas de tamanho silte e argila são separadas uma da outra por sedimentação com aceleração centrífuga ou gravitacional, baseada na lei de Stokes, e são constituídas basicamente por complexos organo-minerais. Em função disso, alguns trabalhos (Cambardella & Elliott, 1992; Feller & Beare, 1997; Bayer et al., 2001) consideram toda a matéria orgânica dessa fração como sendo associada com minerais, embora também possa ocorrer a presença de MOP na mesma (Tiessen & Stewart, 1983; Neufeldt et al., 2002).

As frações obtidas pelo método de fracionamento físico se identificam melhor com aquelas estabelecidas teoricamente com base na localização do material orgânico (item 2.3.1.a), o que permite a obtenção de informações referentes ao grau de proteção física, expressa pela quantidade de MOP, e proteção coloidal, expressa pela quantidade de matéria orgânica associada com minerais.

### **2.3.3. Frações orgânicas do solo e o índice de manejo de carbono (IMC)**

O manejo do solo é um dos principais fatores que determinam a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema de produção agrícola (Vezzani, 2001). Em função disso existe a necessidade de obtenção de índices



que possam avaliar a capacidade do sistema de manejo em promover a qualidade do solo e a sustentabilidade do agroecossistema. Entre vários índices existentes, Blair et al. (1995) sugerem o Índice de Manejo de Carbono (IMC), o qual leva em consideração aspectos da labilidade da MOS. Nesse caso, os autores consideram como fração lábil aquela que é oxidada pelo ataque com  $\text{KMnO}_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$ .

O "IMC" é calculado da seguinte forma:

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{IL} \times 100$$

onde IEC = índice de estoque de carbono

IL = índice de labilidade

O "IEC" é calculado da seguinte forma:

$$\text{IEC} = \text{C}_T \text{ tratamento} / \text{C}_T \text{ referência}$$

onde  $\text{C}_T$  tratamento = estoque total de C no solo do sistema de manejo que está sob avaliação

$\text{C}_T$  referência = estoque total de C no solo do tratamento referência, geralmente o solo sob vegetação nativa

O "IL" é calculado da seguinte forma:

$$\text{IL} = \text{L tratamento} / \text{L referência}$$

onde L tratamento = labilidade da matéria orgânica do solo do sistema de manejo que está sob avaliação

L referência = labilidade da matéria orgânica do solo do tratamento referência

O "L" é calculado da seguinte forma:

$$\text{L} = \text{C lábil} / \text{C não lábil}$$

onde C lábil = proporção do estoque total de C que é oxidado por  $\text{KMnO}_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$  (conforme proposta original de Blair et al., 1995).

C não lábil = proporção do estoque total de C que não é oxidado por  $\text{KMnO}_4$   $333 \text{ mmol L}^{-1}$  (obtido pela diferença entre o C total e o C oxidado).

Em função de algumas dificuldades de se remover o excesso de  $\text{KMnO}_4$  da amostra após o tempo preestabelecido para a oxidação, o que resulta na continuidade da reação (Fontana & Mielniczuk, 2001, informação pessoal), esse método químico de fracionamento da matéria orgânica para obtenção da fração lábil apresenta certas limitações. Entretanto, é provável que o método de fracionamento físico da matéria orgânica possa substituir esse método químico de obtenção da fração lábil. Nesse caso, assumiria que a MOP, obtida por fracionamento físico, fosse proporcional a fração lábil. Porém até o momento ainda não se tem registros do emprego de dados obtidos via fracionamento físico no cálculo do índice de labilidade (IL).

#### **2.3.4. Manejo do solo e a relação com o estoque de matéria orgânica nas frações físicas**

Da mesma forma como para o solo integral, o estoque de matéria orgânica em cada fração também pode ser explicado pelo modelo  $C_t = C_0 e^{-k_2 t} + A k_1 / k_2 [1 - e^{-k_2 t}]$  (Dalal & Mayer, 1987), com o manejo do solo também atuando sobre os parâmetros adição (A), através dos sistemas de culturas, e taxa de mineralização ( $k_2$ ), através da influência sobre os mecanismos de proteção da matéria orgânica. Na seqüência segue uma discussão sobre como esses parâmetros, influenciados pelo manejo do solo, atuam na definição dos estoques de MOP e de matéria orgânica associada com minerais.

##### **a) Matéria orgânica particulada (MOP)**

O estoque de MOP depende da adição de resíduos do sistema de culturas (Pillon, 2000; Bayer et al., 2001) e da magnitude da proteção física exercida pelos agregados (Christensen, 1996; Sollins et al., 1996; Baldock & Skjemstad, 2000). Quanto as adições, Pillon (2000) observou que na camada de 0-2,5 cm de um solo manejado sob plantio direto, o sistema de culturas aveia/milho, com menor adição de resíduos, apresentou um menor estoque de C na MOP ( $1,08 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) que o sistema de maior adição guandu+milho ( $2,04 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ). De modo semelhante, Bayer et al., (2001) constataram um estoque de C 150% superior na MOP do sistema de culturas guandu+milho em relação ao sistema solo descoberto, na camada de 0-17,5 cm. Ambos casos reportam a importância do sistema de culturas na definição do estoque de MOP no solo.

Devido a essa dependência da vegetação, o estoque de MOP possui uma significativa variabilidade espacial e temporal (Christensen, 1992). Nos solos de plantio direto, campo nativo ou de floresta, onde a parte aérea das plantas e grande proporção dos resíduos radiculares se depositam nas camadas superficiais, ocorre uma diminuição considerável na quantidade de MOP a partir da superfície para as camadas mais profundas (Spycher et al., 1983; Pillon, 2000). Enquanto isso, variações ao longo do tempo são relacionadas com a sazonalidade do crescimento vegetal e da deposição dos resíduos, de modo que em algumas situações a quantidade de MOP pode variar até 100% no período de um ano (Spycher et al., 1983). Por isso é importante considerar a possibilidade de existência dessas variabilidades no momento de se amostrar o solo e de se interpretar os resultados nos estudos de MOP.

Com relação a proteção física da MOP pelos agregados, esses dificultam o ataque microbiano, por atuarem como barreiras físicas e diminuírem a disponibilidade de O<sub>2</sub> para os processos oxidativos de decomposição. Os agregados são geralmente separados em duas classes: macroagregados (>250 µm) e microagregados (<250 µm) (Edwards & Bremner, 1967). Os responsáveis pela proteção física da MOP são geralmente os macroagregados e a porção > 50 µm dos microagregados, os quais também contêm fragmentos particulados de plantas e hifas (Tisdall & Oades, 1982; Golchin et al., 1997). Assim, o mínimo revolvimento do solo no sistema plantio direto e a conseqüente preservação desses agregados permite maior proteção e acúmulo de MOP. Isso pode ser exemplificado claramente através de um estudo realizado por Bayer et al. (2002a), onde o estoque de MOP na camada de 0-17,5 cm do sistema aveia+vica/milho+caupi foi 36% superior no solo sob plantio direto (9 anos) em relação ao solo sob preparo convencional. Entretanto, além do fator manejo do solo, a magnitude desse mecanismo de proteção física também depende da textura do solo, sendo que solos argilosos possuem maior capacidade de proteger fisicamente a MOP que os arenosos (Golchin et al., 1994).

Devido a MOP ser uma fração lábil e com maior taxa de reciclagem dos constituintes orgânicos, as alterações em seus estoques promovidas pelo manejo do solo são percebidas geralmente a curto prazo, em comparação as

alterações mais lentas que ocorrem no solo como um todo (Balesdent, 1996; Feller & Beare, 1997; Bayer et al., 2002a). Por isso a MOP é tida como uma fração relativamente sensível as praticas de manejo (Janzen et al., 1992; Pillon, 2000; Bayer et al., 2002a). Essa maior sensibilidade da MOP a um determinado sistema de manejo do solo torna-a uma importante fração na avaliação da qualidade do sistema no curto prazo (3-4 anos), sem a necessidade de aguardar até que as alterações nos estoques totais sejam perceptíveis (Gregorich & Janzen, 1996; Bayer et al. 2001; Freixo et al., 2002). É por isso também que se acredita que a MOP possa ser um indicador da labilidade da matéria orgânica, de modo a permitir seu uso na definição do índice de manejo de carbono (IMC), como discutido anteriormente (item 2.3.3).

#### b) Matéria orgânica associada com minerais

O estoque de matéria orgânica na fração associada com minerais depende da quantidade de material orgânico que é transferido da MOP e da magnitude da proteção coloidal exercida pelas superfícies minerais (Christensen, 1996; Sollins et al., 1996; Baldock & Skjemstad, 2000). A quantidade de matéria orgânica transferida da fração particulada para a fração associada com minerais depende obviamente da adição inicial de resíduos feita pelo sistema de culturas. Além disso, quanto maior o tempo de residência da MOP dentro dos macroagregados, como ocorre no plantio direto, maior é a probabilidade de incorporação desses constituintes orgânicos às estruturas de microagregados e a partir desses à fração associada com minerais (complexos organo-minerais) (Jastrow, 1996; Puget et al., 2000).

Na proteção coloidal da matéria orgânica associada com minerais, os microrganismos têm acesso ao substrato orgânico, porém encontram dificuldades em removê-lo da superfície mineral onde está adsorvido (Christensen, 1996; Sollins et al., 1996). Essa adsorção ocorre através de vários processos, como reações de coordenação (troca de ligantes), pontes de cátions, troca de cátions, protonação, troca de ânions, pontes de água, interações de van der Waals e interações hidrofóbicas (Greenland, 1965a; Sposito, 1989; Cornejo & Hermosín, 1996). Desses, talvez os mais importantes são as reações de coordenação e as interação hidrofóbicas. No primeiro caso, o grupo carboxílico ou fenólico da matéria orgânica substitui o grupo hidroxila

dos minerais e passa a coordenar diretamente o metal (Fe ou Al), estabelecendo-se com isso a adsorção. Enquanto isso, as interações hidrofóbicas ocorrem graças ao caráter anfifílico de alguns compostos orgânicos, os quais formam uma espécie de dupla membrana sobre a superfície mineral, com as porções apolares voltadas para dentro da membrana e as polares para fora, os quais interagem com as respectivas porções polares dos grupos minerais, estabelecendo-se a adsorção.

Por ser um processo de interação organo-mineral, a magnitude da proteção coloidal depende diretamente de fatores do solo, como textura e mineralogia. Em função da menor área superficial específica e da baixa densidade de cargas, acredita-se que partículas discretas de areia e silte tenham reduzida contribuição nesse mecanismo de proteção em relação as partículas de tamanho argila. Dessa forma, quanto mais argiloso for o solo, maior é a magnitude do mecanismo de proteção coloidal e o estoque de matéria orgânica na fração associada com minerais (Feller & Beare, 1997).

As alterações nos estoques de matéria orgânica associada com minerais promovidas pelo manejo do solo são percebidas geralmente a longo prazo (Sá et al., 2001; Bayer et al., 2002a), em comparação as alterações relativamente rápidas nos estoques de MOP, como visto anteriormente. Enquanto o estoque de MOP na camada de 0-2,5 cm aumentou 221% no solo sob plantio direto em relação ao sob preparo convencional, esse aumento foi bem menor (62%) na matéria orgânica associada com minerais (Bayer et al., 2002a).

Com relação ao acúmulo de matéria orgânica nas frações físicas do solo, um questionamento que surge é se tais frações possuem ou não uma capacidade finita de estocar matéria orgânica em função de crescentes níveis de adição de resíduo. Existe uma corrente de pesquisadores que defende a existência de uma capacidade finita de acúmulo de matéria orgânica na fração associada com minerais, o que resultaria inclusive numa capacidade finita de armazenar matéria orgânica no solo como um todo (Hassink, 1997; Baldock & Skjemstad, 2000; Six et al. 2002). Isso ocorreria quando todos os sítios de adsorção das superfícies minerais estariam saturados. Nas condições de um Latossolo do Cerrado, Roscoe et al. (2001) encontraram uma concentração máxima de C na fração argila de 32,5 g C kg<sup>-1</sup>, sugerindo também que nesta

concentração a fração estaria com sua capacidade de armazenar C saturada. Por outro lado, Christensen (2001) considera a possibilidade de que partículas minerais, na forma de complexos organo-minerais, possuem uma capacidade ilimitada de acomodar matéria orgânica, onde o próprio material que se acumula na superfície mineral seria responsável pela formação de novos sítios de adsorção, onde material orgânico mais recente pudesse ser acumulado e assim sucessivamente.

### **2.3.5. Técnicas analíticas para avaliação da qualidade da matéria orgânica do solo**

Atualmente várias técnicas são empregadas na Ciência do Solo com o objetivo de identificar e também quantificar compostos presentes na matéria orgânica do solo. Essas poderiam ser separadas em dois principais grupos: as degradativas, ou seja, as que promovem a lise dos compostos orgânicos antes da análise propriamente dita, e as não degradativas, que preservam tais compostos. Entre as principais técnicas degradativas estão a hidrólise, pirólise e termo-hidrólise, cujos produtos do processo degradativo são identificados e/ou quantificados principalmente através de colorimetria, cromatografia gasosa ou líquida e espectrometria de massas (Kögel-Knabner, 2000; Hatcher et al., 2001). Com relação as técnicas não degradativas, cabe destacar as espectroscópicas, como ressonância magnética nuclear (RMN), ressonância paramagnética eletrônica (EPR), fluorescência, infravermelho (IR) e ultravioleta/visível (UV/vis) (Ceretta et al., 1999; Kögel-Knabner, 2000; Hatcher et al., 2001; Bayer et al., 2002b; Milori et al., 2002).

Neste trabalho de tese foram empregadas as técnicas não degradativas de espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C e RMN-<sup>15</sup>N e as técnicas degradativas de hidrólise ácida e pirólise analítica. Em função disso, as mesmas serão descritas brevemente com relação a seus princípios, vantagens e limitações.

a) Ressonância magnética nuclear: RMN-<sup>13</sup>C e RMN-<sup>15</sup>N

A espectroscopia de RMN permite identificar e de certa forma quantificar os tipos de C e N constituintes da matéria orgânica do solo. Na espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C, a amostra é submetida a um campo magnético (Bo). A população de núcleos do isótopo <sup>13</sup>C se divide em duas: uma com maior e outra com menor nível energético. A quantidade de energia requerida para que um determinado núcleo no nível energético mais baixo passe para o nível energético mais alto é quantizada, ou seja, deve ser exata, e depende do ambiente químico onde o respectivo átomo se encontra. Se um átomo de <sup>13</sup>C esta numa estrutura alifática, a energia requerida é diferente daquela requerida por um átomo de <sup>13</sup>C que está presente numa estrutura aromática. Assim a técnica consegue distinguir os diferentes tipos de C presentes na amostra.

A energia é fornecida ao sistema por radiação eletromagnética. Quando a frequência de radiação for aquela que forneça a quantidade exata de energia para que um determinado núcleo de <sup>13</sup>C passe para o estado energético mais alto, esse entra em ressonância. O sinal da ressonância é detectado e, após a transformada de Fourier, é convertido em um pico, numa posição específica do espectro com escala de deslocamento químico (ppm). Além da identificação dos diferentes tipos de C, a técnica também permite, de certo modo, quantificá-los, através da integração da área dos respectivos picos de ressonância presentes no espectro. Geralmente os espectros de RMN-<sup>13</sup>C são divididos em quatro regiões espectrais, que correspondem a diferentes tipos de C (Tabela 2.1).

Para a espectroscopia de RMN-<sup>15</sup>N, valem os mesmos princípios da espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C. Entretanto seu emprego não é tão difundido devido a algumas limitações que serão discutidas adiante. As principais regiões espectrais da RMN-<sup>15</sup>N são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.1. Principais regiões e sub-regiões espectrais para RMN-<sup>13</sup>C (Knicker & Lüdemann, 1995; Kögel-Knabner, 1997; Kögel-Knabner, 2002).

região espectral (ppm) <sup>1/</sup>	sub-região espectral (ppm) <sup>1/</sup>	tipo de C
220 – 160 C carbonila	220 - 185	C aldeído [200 ppm]
		C cetona [200 ppm]
	185 - 160	C carboxila [172, 175 ppm]
		C amida [172, 175 ppm] C éster [172, 175 ppm]
160 – 110 C aromático	160 - 140	C O-substituído (fenol) [150 ppm]
		C4 de <i>p</i> -hidroxifenol (lignina) [160 ppm]
		C3, C5 de siringil (lignina) [153 ppm]
		C3, C4 de guaiacil (lignina) [148 ppm]
	140 - 110	C olefina (liga dupla)
		C C-substituído [130 ppm] C H-substituído [119 ppm]
110 – 45 C O-alquil	110 - 90	C anomérico de carboidratos [104, 105 ppm]
	90 - 60	C2 a C5 de carboidratos [72 ppm]
	60 - 45	C metoxila (-OCH <sub>3</sub> ) [56 ppm]
		C $\alpha$ da maioria dos aminoácidos [56 ppm] C6 de alguns polissacarídeos
45 – (-10) C alquil	45 – (-10)	C metileno (-CH <sub>2</sub> -) em estruturas alifáticas (lipídios ou proteínas) [30, 31, 32 ppm]
		C metila (-CH <sub>3</sub> ) em grupos acetil [21 ppm]
		C metila (-CH <sub>3</sub> ) [15 ppm]

<sup>1/</sup> O composto tetrametilsilano (TMS) é usado como referência para a escala de deslocamento químico (= 0 ppm)

Tabela 2.2. Principais regiões espectrais para RMN-<sup>15</sup>N (Knicker & Lüdemann, 1995; Kögel-Knabner, 1997).

região espectral (ppm) <sup>1/</sup>	tipo de N
25 a -25	nitrito, nitrito, grupos nitro
-25 a -90	imina, fenazina, piridina, bases de Schiff
-90 a -145	purina, grupos nitrila
-145 a -220	N clorofila, purina/pirimidina, imidazol, porróis substituídos
-220 a -285	amida/peptídios [-256 ppm], derivados de N-acetil de amino açúcares, triptofano, prolina, lactamos, pirróis não substituídos, indol.
-285 a -325	grupo -NH em guanidina, grupos NH <sub>2</sub> - e NR <sub>2</sub> -
-325 a -350	grupos -NH <sub>2</sub> livres em aminoácidos e amino açúcares
-350 a -375	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>

<sup>1/</sup> O composto nitrometano é usado como referência para a escala de deslocamento químico (= 0 ppm)

Tanto para o elemento carbono como para o nitrogênio, infelizmente o fenômeno de RMN ocorre somente com os isótopos <sup>13</sup>C e <sup>15</sup>N, respectivamente de menor abundância relativa. Isso, associado com a baixa concentração natural desses elementos nas amostras de solo, reduz consideravelmente a resolução dos espectros. No entanto, essa limitação pode ser contornada por meio da concentração desses elementos com tratamento



de ácido fluorídrico (HF), o qual remove a porção mineral da amostra sem causar consideráveis alterações estruturais na matéria orgânica (Skjemstad et al., 1994; Schmidt et al., 1997; Gonçalves et al., 2003).

A fim de também melhorar a resolução dos sinais e aumentar a relação sinal/ruído dos espectros de amostras no estado sólido, emprega-se a técnica de rotação em ângulo mágico (MAS, "Magic Angle Spinning"). Essa consiste em girar o rotor da amostra em torno do eixo do campo magnético, num ângulo de  $54,7^\circ$ , em alta velocidade (5-10 kHz, dependendo do equipamento). Com isso, anulam-se algumas interações de acoplamento ( $^{13}\text{C}$ - $^1\text{H}$ ) e também alguns efeitos anisotrópicos sobre o deslocamento químico (Wilson, 1987; Kinchesh et al., 1995).

Outra técnica muito empregada para RMN de  $^{13}\text{C}$  e  $^{15}\text{N}$  em amostras no estado sólido é a polarização cruzada (CP, Cross Polarization), onde a energia (magnetização) de prótons ( $^1\text{H}$ ) é transferida para os núcleos de  $^{13}\text{C}$  ou de  $^{15}\text{N}$ . Isso aumenta a intensidade do sinal desses núcleos e permite que o intervalo entre um pulso de radiofrequência e outro seja mais curto, já que este é baseado na relaxação dos prótons e não mais na relaxação dos núcleos de  $^{13}\text{C}$  ou  $^{15}\text{N}$  (Wilson, 1987; Kinchesh et al., 1995).

Uma das grandes vantagens do emprego da RMN é a obtenção de informações sobre todos os tipos de C (ou N) presentes na amostra através de um único espectro. Além disso, a possibilidade de aplicação em amostras no estado sólido, através das técnicas de polarização cruzada e ângulo mágico de rotação, evita a necessidade de extração prévia do material orgânico e, conseqüentemente, problemas como a formação de artefatos e alterações estruturais (Kögel-Knabner, 1997).

Algumas limitações da RMN referem-se a quantificação dos diferentes tipos de C (ou N). Na técnica de polarização cruzada, prótons que estão associados com diferentes tipos de  $^{13}\text{C}$  (ou  $^{15}\text{N}$ ) podem apresentar tempos distintos de relaxação na estrutura de rotação ( $T_{1\rho\text{H}}$ ). Assim, quando um tempo de contato é definido (ex.: 1ms), pode ocorrer, em casos extremos, de que para alguns tipos de  $^{13}\text{C}$  (ou  $^{15}\text{N}$ ) a relaxação já tenha terminado enquanto que para outros a polarização cruzada (transferência de magnetização) ainda não tenha sido completada, resultando em diferentes intensidades de sinais e conseqüentemente a quantificação não irá expressar o

que realmente está contido na amostra. Entretanto, isso não descarta a possibilidade de uso da quantificação para alguma avaliação mais geral da estrutura orgânica, onde comparações entre amostras de natureza semelhante são realizadas.

A presença de elementos paramagnéticos como  $\text{Fe}^{3+}$ , que apresentam elétrons não pareados também pode reduzir o tempo de relaxação de prótons na estrutura de rotação ( $T_{1\rho H}$ ) e alterar a intensidade dos sinais, com conseqüências negativas para a quantificação (Wilson, 1987; Kinchesh et al., 1995). Isso é um problema em amostras que contém elevados teores de óxidos de ferro, como muitos Latossolos brasileiros (Gonçalves et al., 2003). No entanto, o tratamento com ácido fluorídrico (HF), utilizado para concentrar o C e N, também remove simultaneamente o  $\text{Fe}^{3+}$  da amostra, minimizando esse problema (Skjemstad et al., 1994; Schmidt et al., 1997; Gonçalves et al., 2003).

No caso de RMN- $^{15}\text{N}$ , pelo fato do isótopo  $^{15}\text{N}$  possuir uma abundância relativa menor (0,36%) que a do  $^{13}\text{C}$  (1,11%) e devido suas propriedades magnéticas (razão giromagnética negativa), a sensibilidade dessa técnica espectroscópica é 50 vezes menor que a RMN- $^{13}\text{C}$ . Isso restringe seu uso generalizado, pois para a aquisição de um espectro de boa relação sinal/ruído o tempo necessário é consideravelmente maior em relação a RMN- $^{13}\text{C}$  (Kögel-Knabner, 1997).

#### b) Hidrólise ácida

A hidrólise ácida é uma das técnicas mais antigas de avaliação das formas orgânicas de N no solo (Bremner, 1965). Seu princípio baseia-se na liberação (hidrólise) dos compostos nitrogenados através do emprego de ácidos (geralmente  $\text{HCl}$  6 mol  $\text{L}^{-1}$ ) em elevada temperatura (~110 °C). Posteriormente, o N é separado em várias frações: N-não hidrolisado, N-aminoácido, N-aminoaçúcar, N-amônia e N-hidrolisado desconhecido (Stevenson, 1996). Existem várias formas de proceder essa análise, dependendo dos objetivos propostos (Stevenson, 1996; Camargo et al., 1999).

O *N-não hidrolisado* é aquele que permanece no resíduo da amostra após a hidrólise e é separado da porção hidrolisada através de filtração. Destilando-se parte da porção hidrolisada com  $\text{MgO}$ , determina-se a quantidade de *N-amônia*, que provavelmente é derivado da degradação de

alguns aminoaçúcares e aminoácidos durante a hidrólise (ex., aspargina e glutamina) (Stevenson, 1994; Schulten & Schnitzer, 1998). O *N-aminoaçúcar* é determinado por destilação com um tampão fosfato-borato a pH 11,2, descontando-se a quantidade previamente determinada de N-amônia. Para a determinação do *N-aminoácido*, o procedimento convencional é, após a remoção do N-amônia e do N-aminoaçúcar (por destilação ou por tratamento do hidrolisado com NaOH), proceder a reação com ninidrina a pH menor que 2,5, de forma que o N-NH<sub>2</sub> dos aminoácidos é convertido para e N-NH<sub>3</sub> e posteriormente destilado e quantificado. Por fim, a proporção de *N-hidrolisado desconhecido* é obtida pela diferença entre os 100% totais e as proporções das demais formas anteriormente avaliadas.

Para a avaliação da proporção de N-aminoácido também existe um método alternativo, baseado em colorimetria (Stevenson, 1996). Nesse caso, após a remoção do N-amônia e do N-aminoaçúcar por tratamento com NaOH, o hidrolisado é tratado com ninidrina a pH 5. A reação entre a ninidrina e o N-NH<sub>2</sub> dos aminoácidos produz um composto de coloração azul, cuja intensidade da cor é medida em colorímetro operando a 570 nm e correlacionada com a concentração de N-aminoácido.

Pelos dados de hidrólise ácida de solos de várias regiões do mundo, entre 20-35% do N total é considerado como N-não hidrolisado, 20-45% é N-aminoácido, 5-10% é N-aminoaçúcar, 20-25% é N-amônia e 10-20% é N-hidrolisado desconhecido (Stevenson, 1994). Disso resulta que em alguns casos aproximadamente a metade do N total do solo (N-não hidrolisado + N-hidrolisado desconhecido) não é caracterizada por esse método convencional de análise (Schulten & Schnitzer, 1998). Outras técnicas, como espectroscopia de RMN-<sup>15</sup>N (Knicker & Lüdemann, 1995) e pirólise analítica (Schulten & Schnitzer, 1998) podem fornecer informações complementares para um melhor entendimento dessas formas desconhecidas de N. Porém os resultados dessas duas técnicas são geralmente distintos, pois enquanto RMN-<sup>15</sup>N fornece a informação de que o N desconhecido está basicamente na forma de amida, em estruturas peptídicas (Knicker & Lüdemann, 1995), a pirólise analítica indica que esse N está na forma de estruturas heterocíclicas como imidazol, pirazol, pirrol, entre outras (Schulten & Schnitzer, 1998).

### c) Pirólise analítica

Existem diferentes tipos de pirólise analítica, sendo que no presente caso será discutida somente a pirólise acoplada com cromatografia gasosa e espectrometria de massas (*Py-GC/MS*). O princípio geral da pirólise consiste no rompimento das ligações moleculares através da aplicação de energia térmica (Schulten, 1994). O processo ocorre no vácuo ou em gás inerte (ex. He), sendo que a energia térmica é gerada por um fio de liga metálica, no qual a amostra é aderida. Esse fio é aquecido até seu ponto de Curie através de uma corrente elétrica alternada, a qual promove uma espécie de “fricção” na liga, fazendo com que sua temperatura se eleve. Para fios de ferro puro essa temperatura pode atingir 770 °C (Schulten, 1994). Posteriormente os fragmentos moleculares voláteis são separados por cromatografia gasosa (GC) e detectados por espectrometria de massas (MS).

Vários autores consideram a *Py-CG/MS* uma técnica útil para investigar a qualidade da matéria orgânica do solo e de substâncias húmicas (Schulten, 1994; Saiz-Jimenez et al., 1996; Leinweber & Schulten, 1999; González-Vila et al., 2001; Chefetz et al., 2002). A técnica detecta importantes particularidades dos compostos orgânicos, permitindo conhecer se sua origem é de material alifático, proteico, aromático ou carboidrato. Entretanto, como uma elevada quantidade de energia térmica é aplicada durante o processo de pirólise propriamente dito, alterações significativas na estrutura molecular podem ocorrer, de maneira que nem sempre é possível identificar a origem de um determinado fragmento. Em função disso, é importante considerar os dados de *Py-GC/MS* com certa cautela e de preferência associados com dados de outras técnicas analíticas (Kögel-Knabner, 2000).

### **2.3.6. Manejo do solo e a relação com a qualidade química da matéria orgânica**

É relativamente grande o volume de informações científicas que tratam sobre as alterações que o manejo do solo promove nos estoques de matéria orgânica. Porém o conhecimento referente as implicações do manejo sobre a qualidade da matéria orgânica ainda é limitado e não conclusivo,

principalmente para solos de regiões tropicais e subtropicais. Provavelmente a falta de metodologias adequadas bem como a limitada disponibilidade de instrumentos analíticos, geralmente de custo bastante elevado, são alguns dos empecilhos que dificultam o avanço de um conhecimento mais profundo da relação entre o manejo do solo e as características qualitativas da matéria orgânica.

Conhecer a qualidade (composição, natureza, estrutura, etc) da matéria orgânica do solo e de suas frações é uma forma de melhor entender as funções que a mesma exerce. Assim, por exemplo, conhecendo-se o grau de aromaticidade da matéria orgânica é possível inferir sobre o seu grau de recalcitrância. A proporção de grupos carboxílicos ou fenólicos da matéria orgânica pode informar a respeito de aspectos relacionados com a CTC do solo. Talvez a hidrofobicidade poderia sugerir algo sobre a capacidade de retenção de água no solo. Com certeza vários outros exemplos podem ser levantados seguindo a mesma linha de raciocínio. No entanto, em função das limitações metodológicas, essa relação entre a qualidade da matéria orgânica e a magnitude de uma determinada função por ela exercida nem sempre é possível de ser estabelecida.

A preocupação com relação aos efeitos do manejo sobre as características da matéria orgânica é bastante antiga e provavelmente remonta ao tempo em que as primeiras análises elementares foram realizadas, quando foi possível a obtenção de informações qualitativas como a relação C:N. O desenvolvimento de métodos analíticos degradativos, como a hidrólise ácida, também permitiu um avanço nos estudos qualitativos da matéria orgânica, especialmente sobre as formas de N orgânico do solo (Bremner, 1965). Mais tarde, as técnicas espectroscópicas, como ultravioleta/visível (UV/Vis), infravermelho (IR), ressonância magnética nuclear (RMN), ressonância paramagnética eletrônica (EPR) e, mais recentemente, fluorescência começaram a ser aplicadas na Ciência do Solo com o intuito de também estudar as relações entre sistemas de manejo e características qualitativas da matéria orgânica (Stevenson, 1994; Martin-Neto et al., 1994; Bayer et al., 2002b).

Um dos primeiros trabalhos com uso da técnica espectroscópica de RMN-<sup>13</sup>C no estado sólido (CPMAS) na avaliação do efeito do cultivo do solo

sobre as características da matéria orgânica foi o de Skjemstad et al. (1986). Após 20, 35 e 45 anos de cultivo de trigo num Vertissolo australiano, as alterações qualitativas foram mínimas, embora os estoques originais de MOS reduzissem para menos da metade. Isso levou os autores a concluírem que a decomposição da matéria orgânica não estava sendo seletiva, visto que para isso a proporção de material aromático, por ser mais recalcitrante, deveria aumentar com o tempo de cultivo, o que não foi o caso. Assim, concluíram que não era a qualidade intrínseca dos compostos (recalcitrância) que estava determinando a estabilidade da matéria orgânica ao longo do cultivo, mas sim outros mecanismos de estabilização, como a proteção física exercida pelo solo.

Entretanto, para um Molisolo (Chernossolo) argentino, após 10 anos de cultivo com soja, a concentração de radicais livres semiquinona, que estão relacionados com a presença de compostos aromáticos condensados que os estabilizam, aumentou consideravelmente nas frações granulométricas < 50µm, segundo dados obtidos com espectroscopia EPR (Martin-Neto et al., 1994). Isso indica, portanto, que é possível a ocorrência de alterações qualitativas na matéria orgânica em função do cultivo.

Percebe-se que o fato de um trabalho sugerir que a qualidade da matéria orgânica do solo não é dependente do cultivo e outro sugerir que há uma dependência pode estar relacionado com a técnica analítica empregada. A espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C, empregada no trabalho de Skjemstad et al. (1986), detecta todo o espectro de compostos orgânicos presentes no solo, de maneira que a obtenção de informações mais detalhadas fica prejudicada. Enquanto isso a espectroscopia EPR, utilizada por Martin-Neto et al. (1994), detecta especificamente os radicais livres semiquinona, tendo-se uma avaliação mais precisa desses, porém não considera os demais constituintes orgânicos. Numa analogia seria afirmar que a técnica de RMN observa a “floresta” enquanto a técnica de EPR, ou outras mais específicas, observam uma “determinada espécie de árvore”.

A reduzida influência do cultivo sobre a qualidade da matéria orgânica do solo, como observado por Skjemstad et al. (1986), foi confirmada por trabalhos de Oades et al., (1988), Preston et al. (1994) e Golchin et al. (1995), todos com emprego de espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C CPMAS. O que geralmente ocorre são alterações qualitativas na matéria orgânica particulada

(MOP) (Oades et al., 1988; Golchin et al., 1995), que estão associadas com variações na composição florística dos sistemas de manejo, visto que a fração particulada é constituída basicamente por resíduos de planta (Gregorich & Janzen, 1996). Mas na fração argila as diferenças composicionais são mínimas. Em função disso, Oades et al. (1988) concluíram que a qualidade da matéria orgânica na fração argila é determinada principalmente pelas características da comunidade microbiana e seus respectivos produtos (mucilagens, metabólitos e resíduos celulares), bem como pela interação desses com a porção mineral do solo, e não pela quantidade e natureza dos resíduos vegetais adicionados. Assim, em solos com comunidades microbianas similares, a composição orgânica da fração argila também tende a ser similar. Apesar disso, Preston et al. (1994) observaram que após 65 anos de cultivo do solo, a fração argila continha menor proporção de C O-alquil e maior de C alquil em relação ao solo original de campo nativo, demonstrando a possibilidade de também haverem diferenças na qualidade da matéria orgânica desta fração.

Com relação ao efeito de sistemas de preparo do solo, trabalhos envolvendo espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C sobre ácidos húmicos extraídos da camada superficial do solo (até 5 cm de profundidade) possuem conclusões distintas. Enquanto Stearman et al. (1989), num experimento de 7 anos, concluem não haver diferença entre a qualidade dos ácidos húmicos do solo em função do sistema de preparo, Ding et al. (2002) observaram maior aromaticidade e menor proporção de C O-alquil (carboidrato) nos ácidos húmicos do solo sob preparo convencional em relação ao sob plantio direto, após 20 anos de manejo. Talvez o tempo seja a variável que explique essa diferença de resultados entre os dois trabalhos, de maneira que alterações na qualidade da matéria orgânica em função do tipo de preparo do solo se tornem mais perceptíveis com o passar do tempo, como observado no trabalho de Ding et al. (2002).

Através do emprego da espectroscopia de EPR sobre ácidos húmicos da camada de 0-2,5 cm, Bayer et al. (2002b) encontraram maior concentração de radicais livres semiquinona e, conseqüentemente, maior grau de aromaticidade no solo preparado convencionalmente em relação ao solo sob plantio direto, concordando com o resultado de RMN-<sup>13</sup>C CPMAS obtido por Ding et al., (2002). Resultados semelhantes também foram obtidos por

espectroscopia de fluorescência, de maneira que a intensidade do sinal de emissão de fluorescência foi maior no solo sob preparo convencional, indicando a presença de maior quantidade de estruturas aromáticas condensadas (Bayer et al., 2002b). Essa maior concentração de estruturas aromáticas no solo sob preparo convencional foi atribuída a maior resistência (recalcitrância) das mesmas ao processo de decomposição oxidativa, como também explicado por Martin-Neto et al. (1994) com relação ao efeito do cultivo do solo.

Entretanto, num estudo com frações granulométricas foi possível observar que a maior concentração de radicais livres semiquinona no solo sob preparo convencional ocorreu nas frações  $> 2 \mu\text{m}$  (silte e areia) (Bayer, 1996; Bayer et al., 2002a). Enquanto isso, na fração tamanho argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ) as concentrações de semiquinona foram muito semelhantes entre o plantio direto e o preparo convencional. Comparando a composição da matéria orgânica entre diferentes sistemas de uso do solo, Guggenberger et al. (1995), trabalhando com RMN- $^{13}\text{C}$  CPMAS, também observaram que a principal diferença ocorreu na fração silte, onde a concentração de C aromático foi maior no solo agrícola em relação aos de floresta e pastagem. De certa forma esses resultados são coerentes com os de Oades et al. (1988) e Golchin et al. (1995), que indicam não haver influência do manejo na qualidade da matéria orgânica de frações granulométricas de tamanho argila.

Referente ao efeito de sistemas de culturas sobre a qualidade da matéria orgânica, especialmente em solos manejados sob plantio direto, um interessante estudo de caracterização tanto de frações físicas como de frações extraídas quimicamente (ácidos húmicos) vem sendo realizado em experimentos de longa duração conduzidos num Argissolo Vermelho distrófico típico da EEA/UFRGS (Eldorado do Sul, RS) (Lassus, 1990; Ceretta, 1995; Bayer, 1996; Bayer et al., 2000a; Pillon, 2000; Bayer et al., 2002b).

Através do emprego da espectroscopia de RMN- $^{13}\text{C}$  CPMAS sobre ácidos húmicos do solo integral da camada de 0-2,5 cm, Ceretta (1995) e Pillon (2000) observaram certas diferenças qualitativas entre os sistemas de culturas, provavelmente relacionadas com a quantidade de resíduos vegetais adicionada ao solo. No solo descoberto, a aromaticidade dos ácidos húmicos tendeu a ser maior em relação aos demais tratamentos (Ceretta, 1995). Sistemas com baixa



adição de resíduos, como pousio/milho e aveia/milho (ambos sem N), apresentaram maior proporção de C alquil e menor de C O-alquil na fração ácido húmico em comparação aos sistemas com leguminosas (guandu+milho, lablab+milho e aveia+vica/milho+caupi, também sem N) e campo nativo (Pillon, 2000). Ceretta (1995) complementou o estudo através do emprego de outras técnicas espectroscópicas, como UV/Vis, cujo resultado também indicou um maior grau de humificação dos ácidos húmicos do solo descoberto (menor razão  $E_4/E_6$ ), e infravermelho, onde não foram observadas diferenças qualitativas entre os sistemas. Diferente do observado na camada de 0-2,5 cm, não houveram alterações na composição dos ácidos húmicos nas camadas inferiores do solo, até 17,5 cm de profundidade (Pillon, 2000), indicando que no plantio direto a influência do sistema de culturas na qualidade da matéria orgânica é mais restrita as camadas superficiais.

A fração ácido húmico do solo de sistemas de culturas com baixa adição de resíduos, como solo descoberto e aveia/milho (sem N), também apresentou maior concentração de radicais livres semiquinona, como observado através de espectroscopia EPR, o que indica novamente um maior grau de aromaticidade nesses sistemas (Bayer et al., 2000a). Essa informação está de acordo com os dados de Ceretta (1995), obtidos por espectroscopia RMN- $^{13}\text{C}$ . Porém, quando o solo foi fracionado fisicamente, observou-se que essa diferença na concentração de radicais livres semiquinona ocorreu basicamente nas frações  $> 2\mu\text{m}$  (silte e areia) (Bayer, 1996). Na fração argila as concentrações de semiquinona foram muito similares, indicando que nesta as influências de sistemas de culturas foram mínimas (Bayer, 1996), como também observado para os efeitos de sistemas de preparo discutidos anteriormente.

Investigando a qualidade da matéria orgânica particulada (MOP) através de espectroscopia RMN- $^{13}\text{C}$  CPMAS, Pillon (2000) observou consideráveis diferenças entre os sistemas de culturas, de maneira que a MOP (fração leve livre) do sistema GD+MI apresentou a maior proporção de C alquil e o campo nativo a maior proporção de C O-alquil. Maior proporção de carboidratos na fração leve ( $d > 1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ ) de sistemas de culturas baseados em gramíneas também foi encontrada por Lassus (1990), enquanto os sistemas de culturas com leguminosas apresentaram maior proporção de

lignina. Isso demonstra novamente a influência que diferentes composições florísticas possuem sobre a qualidade química da fração particulada da matéria orgânica, visto que essa fração é constituída basicamente por resíduos de planta.

Para amostras de solo integral, pequenas diferenças foram observadas na qualidade da matéria orgânica em função de distintos sistemas de culturas, quando a técnica utilizada foi RMN-<sup>13</sup>C CPMAS (Fründ et al., 1994; Guggenberger et al., 1995; Knicker et al., 2000a; Mendham et al., 2002). Por outro lado, com o emprego da espectroscopia de infravermelho (DRIFT), nos mesmos tratamentos avaliados por Fründ et al. (1994), observou-se diferenças significativas no índice de hidrofobicidade (baseado na concentração de grupos C-H) entre os sistemas de culturas, de modo que tal índice aumentou a partir do solo descoberto para o sistema com rotação de cereais e finalmente para a pastagem com gramíneas (Capriel, 1997). Baseado nesses dados de espectroscopia infravermelho, o autor conclui que o sistema de culturas é um fator importante na determinação das características qualitativas da matéria orgânica do solo.

Outro fator importante do manejo do solo que pode afetar a qualidade da matéria orgânica é a adubação das culturas. No mesmo trabalho de Capriel (1997), com aplicação de espectroscopia infravermelho (DRIFT), um maior índice de hidrofobicidade (grupos C-H) foi observado no solo adubado com NPK em relação ao não adubado. Também com uso de espectroscopia infravermelho, Ellerbrock et al. (1999) observaram alterações na composição da matéria orgânica em função da adubação orgânica + mineral, de maneira que a intensidade da banda de C carboxílico foi maior em sistemas adubados em relação ao não adubado, com reflexos positivos na CTC do solo. Por outro lado, num estudo com emprego de RMN-<sup>13</sup>C, não se verificou influência da adubação, tanto orgânica como mineral, sobre as características qualitativas da matéria orgânica do solo integral e das frações físicas areia, silte e argila (Randal et al., 1995).

Percebe-se que muitas conclusões referentes a qualidade da matéria orgânica em função de sistemas de manejo do solo estão vinculadas com a metodologia de fracionamento (se químico, através de ácidos húmicos ou fúlvicos, ou se físico, através de frações granulométricas ou densimétricas)

e com a técnica analítica em si, o que sugere a consideração desses aspectos na interpretação dos resultados. Entretanto, existe uma tendência geral de ácidos húmicos do solo sob sistemas de culturas apresentarem diferentes características qualitativas. Entretanto, para frações físicas, as maiores diferenças na composição ocorrem na MOP, cujo material orgânico é derivado diretamente dos resíduos vegetais, em relação as frações associadas com minerais, como argila, onde a composição da matéria orgânica parece ser definida pelas características da comunidade microbiana e seus respectivos produtos de decomposição.

## **2.4. Hipótese geral**

No sistema plantio direto o estoque de matéria orgânica do solo e das frações físicas depende do sistema de culturas e da adubação nitrogenada, visto que esses fatores determinam a adição de resíduos vegetais ao solo. Entretanto, a qualidade da matéria orgânica do solo e das frações físicas é independente de tais fatores, exceto para a MOP, que, por ser constituída basicamente de resíduo de plantas, tem sua qualidade afetada pelo sistema de culturas.

As hipóteses específicas são apresentadas nos respectivos estudos.

## **2.5. Objetivo geral**

Ampliar o conhecimento referente as influências do sistema de culturas e da adubação nitrogenada sobre o estoque e a qualidade da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto.

Os objetivos específicos são apresentados nos respectivos estudos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

#### 3.1 Experimento de campo e amostragem de solo e de plantas

A pesquisa foi conduzida a partir do experimento “Cobertura Vegetal como Alternativa de Conservação do Solo”, localizado na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, RS (30° 51' S; 51° 38' W). Trata-se de um experimento de longa duração, instalado em 1983 (Medeiros, 1985), num Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999), de textura franco-argilo-arenosa (540 g kg<sup>-1</sup> de areia, 240 g kg<sup>-1</sup> de silte e 220 g kg<sup>-1</sup> de argila) na camada de 0-15 cm (Silva & Mielniczuk, 1997), derivado de granito. A mineralogia da fração argila é composta de caulinita (720 g kg<sup>-1</sup>), óxidos de ferro (109 g kg<sup>-1</sup>) e outros minerais (171 g kg<sup>-1</sup>) (Bayer, 1996). O clima da região é subtropical úmido (Cfa, pela classificação de Köppen), com temperaturas médias mensais variando entre 13,9 °C e 24,9 °C e precipitações médias mensais entre 96 mm e 168 mm, totalizando 1440 mm anuais. Descrições mais detalhadas da área experimental encontram-se em Pillon (2000).

Originalmente a área possuía vegetação de campo nativo, com *Paspalum* e *Andropogon* como principais gêneros de planta (Moojen, 1991). Em 1969 passou a ser utilizada para a produção de grãos (milho, girassol, colza, etc.), sendo o solo manejado convencionalmente, sem adoção de um plano adequado de práticas conservacionistas. Tal manejo causou severos problemas de degradação do solo, de forma que em 1983 o experimento foi instalado justamente com o objetivo de avaliar a recuperação da capacidade produtiva deste solo através de práticas adequadas de manejo.

Dez sistemas de culturas, subdivididos em dois níveis de adubação nitrogenada na cultura do milho (0 kg N ha<sup>-1</sup> e 180 kg N ha<sup>-1</sup> – até 1994 esta dose foi 120 kg N ha<sup>-1</sup>), constituem os tratamentos experimentais. O

delineamento experimental é de blocos ao acaso com parcelas subdivididas. O sistema de culturas está na parcela (5 x 8 m) e o nível de adubação nitrogenada na subparcela (5 x 4 m). Cada bloco experimental é dividido em dois sub-blocos: o primeiro recebeu adubação corretiva, calagem e descompactação com lavra profunda (aproximadamente 20 cm de profundidade) por ocasião da instalação do experimento, enquanto o segundo não foi descompactado. Cada sub-bloco é dividido em dois sub-sub-blocos, que correspondem aos dois níveis de adubação nitrogenada. Para o presente estudo, foram utilizados os seguintes sistemas de culturas, do sub-bloco cujo solo foi descompactado: i) solo descoberto, sem plantas, com exceção de milho em 1988/89, 1993/94 e 1994/95, e algumas invasoras que foram periodicamente eliminadas com herbicida glifosate; ii) aveia (*Avena strigosa*) / milho [AV/MI]; iii) lablab (*Lablab purpureum*) / lablab + milho [LB+MI] e iv) guandu (*Cajanus cajan*) / guandu + milho [GD+MI]. Foram amostradas as subparcelas com e sem N, exceto no solo descoberto, onde somente a subparcela sem N foi amostrada. Além dos tratamentos referidos, amostrou-se o solo do campo nativo, em três pontos próximos à área experimental, a fim de representar as condições ecológicas originais da área. Na amostragem do campo nativo, o ponto 1 foi no topo de uma coxilha (atrás da guarita da entrada da EEA), o ponto 2 numa área do Departamento de Plantas de Lavoura e o ponto 3 ao lado do experimento (entre a cerca e a estrada).

As espécies constituintes dos sistemas de culturas eram manejadas de acordo com suas particularidades. O milho era semeado em setembro e a aplicação de fertilizante nitrogenado (uréia) em cobertura era realizada quando as plantas possuíam seis folhas completamente expandidas. Irrigação por aspersão era utilizada quando necessária. As espigas de milho eram colhidas e removidas da parcela, inclusive das bordaduras. Guandu e lablab eram semeados 30-40 dias após a emergência do milho, com saraquá, nas entre linhas de plantas de milho, em covas distantes aproximadamente 40 cm, com 3-4 sementes por cova. Após a colheita do milho, tais espécies permaneciam nas respectivas parcelas até o inverno, quando entravam em senescência causada pela geada. A semeadura da aveia preta era realizada em linha, com semeadora, na dose de 80 kg semente ha<sup>-1</sup>, nos meses de abril - maio. Antes da semeadura do milho do cultivo subsequente, as plantas de aveia no estágio

de grão leitoso e os restos culturais de lablab eram rolados com rolo faca. As plantas de guandu eram podadas a aproximadamente 70 cm de altura para promover o rebrote ou, na impossibilidade deste, eliminadas completamente (neste caso, nova semeadura era necessária no verão).

Amostras de solo foram coletadas em agosto de 2000, nos tratamentos solo descoberto, LB+MI e GD+MI, e em maio de 2001, nos tratamentos AV/MI e campo nativo. Dez camadas de solo foram amostradas: 0-2,5; 2,5-7,5; 7,5-17,5; 17,5-27,5; 27,5-37,5; 37,5-47,5; 47,5-57,5; 57,5-67,5; 67,5-87,5 e 87,5-107,5 cm. Duas subamostras foram coletadas em locais aleatórios dentro da subparcela, sendo posteriormente homogeneizadas para se obter uma amostra composta. As três primeiras camadas de solo foram amostradas com o auxílio de uma espátula, abrindo-se uma trincheira de dimensões laterais de 10x10cm. As demais camadas foram amostradas com um trado holandês, tomando-se o cuidado de remover a terra solta do buraco entre uma tradada e outra.

Também foi amostrado o tecido da parte aérea de plantas: milho, na colheita (março 2001); guandu (galhos do ano) e lablab, ambos no florescimento (maio 2001); aveia preta, no pré-florescimento (julho 2001) e campo nativo, no final da estação de crescimento, no outono (maio 2001).

As amostras de solo foram secas ao ar, sobre pratos de papel, em casa de vegetação. Foram cobertas com jornal para evitar a incidência direta dos raios solares. Depois de secas, foram acondicionadas em potes plásticos (1L) e guardadas em depósito. As amostras de tecido vegetal foram secas em estufa de circulação forçada (~40 °C), trituradas em moinho e também acondicionadas em potes plásticos.

Maiores detalhes sobre metodologias são descritos nos estudos específicos.

## **4. ESTUDO I**

### **Alterações nos estoques de C e N do solo promovidas por sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto**

#### **4.1. Introdução**

Considerando que a matéria orgânica do solo (MOS) seja a principal responsável pela CTC e pela estabilidade estrutural dos solos tropicais e subtropicais e também considerando a sua importância ambiental por ser um dreno de C-CO<sub>2</sub> atmosférico, é imprescindível que seus estoques sejam mantidos ou incrementados por meio de práticas adequadas de manejo. Entre tais práticas, destaca-se o plantio direto, que em função do mínimo revolvimento do solo reduz consideravelmente a taxa de mineralização ( $k_2$ ) da matéria orgânica e as perdas por erosão.

A adoção de sistemas de culturas com elevada adição de resíduos, baseados em plantas de cobertura, é outro fator a ser considerado quando se busca manter ou aumentar os estoques de MOS no plantio direto. Entre as plantas de cobertura, as leguminosas de ciclo estival se destacam tanto pela contribuição de N ao solo como pela elevada produção de fitomassa, apresentando, portanto, um grande potencial em aumentar os níveis de MOS. A adubação nitrogenada também pode contribuir no aumento dos estoques de MOS, pois possibilita maior produção de fitomassa e conseqüentemente maior adição de resíduos ao solo (Lovato, 2001).

Várias informações já existem com relação aos efeitos de sistemas de culturas baseados em gramíneas e leguminosas sobre os estoques de matéria orgânica em solos sob plantio direto na região Sul do Brasil (Bayer et al., 2000b; Pillon, 2000; Amado et al., 2001). No entanto, ainda é necessário complementar tais informações com outras que também abordem a influência



da adubação nitrogenada e que considerem a dinâmica da matéria orgânica em camadas subsuperficiais do solo, pouco investigadas até o momento.

Este estudo baseia-se nas seguintes hipóteses, para solos sob plantio direto:

- Sistemas de culturas com leguminosas estivais, devido a contribuição de N através da fixação biológica, que promove maior adição de resíduos vegetais de espécies não leguminosas, e também devido a elevada adição de resíduos vegetais das próprias leguminosas, promovem maior incremento nos estoques de matéria orgânica do solo em relação aos sistemas de culturas constituídos somente de gramíneas.
- A adubação nitrogenada contribui para a manutenção ou incremento dos estoques de matéria orgânica do solo, por aumentar a disponibilidade de N e, conseqüentemente, a adição de resíduos vegetais.
- As camadas subsuperficiais do solo são importantes reservatórios de matéria orgânica, podendo atuar tanto como fonte ou como dreno de C-CO<sub>2</sub> atmosférico, dependendo do sistema de culturas.

Os objetivos deste estudo foram:

- avaliar as perdas de C e de N causadas pelo manejo inadequado do solo, anterior a adoção do plantio direto;
- avaliar a recuperação dos estoques de C e N do solo, promovida por sistemas de culturas com e sem leguminosas estivais sob plantio direto;
- avaliar a influência da adubação nitrogenada do milho nos estoques totais de C e N do solo sob diferentes sistemas de culturas em plantio direto;
- avaliar em quais camadas do solo as alterações nos estoques de C e N causadas por sistemas de culturas sob plantio direto e pela adubação nitrogenada são mais expressivas.

## **4.2. Material e métodos**

### **4.2.1. Experimento de campo e coleta de amostras de solo**

As informações referentes ao experimento de campo e procedimentos de coleta e preparo de amostras de solo foram descritas no Capítulo 3 (Material e Métodos Geral).

### **4.2.2. Tratamentos e análises realizadas**

Neste primeiro estudo foram avaliados todos os tratamentos amostrados a campo, quais sejam: solo descoberto, AV/MI (sem N), AV/MI (com N), LB+MI (sem N), LB+MI (com N), GD+MI (sem N), GD+MI (com N) e campo nativo. Também foram consideradas as 10 camadas de solo: 0-2,5; 2,5-7,5; 7,5-17,5; 17,5-27,5; 27,5-37,5; 37,5-47,5; 47,5-57,5; 57,5-67,5; 67,5-87,5 e 87,5-107,5 cm.

As amostras de solo foram analisadas quanto a concentração de C orgânico e N total, sendo que para isso foram previamente moídas em gral de porcelana, até se obter um material homogêneo, menor que 0,5 mm. As análises foram realizadas por combustão seca, num analisador CN (Vario EL), pertencente ao Departamento de Solos da Universidade Técnica de Munique, utilizando-se em torno de 20 a 30 mg de amostra.

Os dados de concentração de C e N, expressos em massa/massa de solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (Apêndice 1) foram convertidos para massa/volume de solo ( $\text{g dm}^{-3}$ ), considerando-se a densidade de solo do respectivo tratamento e camada (Apêndice 1). Até a profundidade de 27,5 cm, foram utilizados os dados de densidade apresentados por Bayer (1996). Para as camadas mais profundas (além de 27,5 cm), utilizou-se o mesmo valor de densidade da camada de 17,5-27,5 cm. Preferiu-se utilizar os dados de densidade de estudos anteriores e fazer a extrapolação dos mesmos para as camadas mais profundas do que realizar uma nova avaliação da densidade do solo. Embora pertinente, isso implicaria na abertura de uma nova trincheira, a qual certamente destruiria uma significativa área da parcela experimental, representando um dano ao experimento de longa duração.

Os dados foram analisados estatisticamente através da análise de variância. Para a avaliação do efeito de sistema de culturas sobre as

concentrações de C e N e relação C:N das dez camadas de solo, considerou-se somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, num esquema de blocos casualizados com parcela subdividida (sistema de culturas na parcela e camada na subparcela) (ANOVA nos Apêndices 2, 3 e 4). Para avaliar o efeito de sistema de culturas sobre o estoque total de C e N nas camadas integrais de 0-17,5 cm e 0-107,5 cm, considerou-se o esquema blocos casualizados (ANOVA nos Apêndices 5, 6, 7 e 8).

O efeito da adubação nitrogenada sobre as concentrações de C e N e relação C:N nas camadas foi avaliado nos sistemas AV/MI, LB+MI e GD+MI, num esquema de blocos casualizados com parcela sub-subdividida (sistema de culturas na parcela, nível de adubação nitrogenada na subparcela e camada de solo na subsubparcela) (ANOVA nos Apêndices 9, 10 e 11). Para avaliar o efeito da adubação nitrogenada sobre o estoque total de C e N nas camadas integrais de 0-17,5 cm e 0-107,5 cm, utilizou-se os mesmos tratamentos e o esquema blocos casualizados com parcela subdividida (sistema de culturas na parcela e nível de N na subparcela) (ANOVA nos Apêndices 12, 13, 14 e 15). As diferenças entre médias de tratamentos foram analisadas através do teste de Tukey, com níveis de significância de 5% ou 10%.

Os estoques totais de C e N na camada de 0-17,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas avaliados neste estudo foram comparados com os estoques iniciais em 1983 (início do experimento). Esses estoques iniciais foram de 32,6 Mg C ha<sup>-1</sup> e 2,71 Mg N ha<sup>-1</sup>, obtidos a partir dos métodos analíticos de Walkley Black e Kjeldahl, respectivamente (Teixeira, 1988). Entretanto, como as análises no presente estudo foram realizadas pelo método de combustão seca (analisador CN), cujos resultados para o teor de C foram em média 6,65% inferiores aos obtidos por Walkley Black, segundo testes realizados preliminarmente (Apêndice 16), aquele valor inicial de C foi corrigido para 30,4 Mg C ha<sup>-1</sup>. Para nitrogênio, como a diferença de resultados entre os métodos de combustão seca e Kjeldahl foi menor (3,29% inferior no Kjeldahl, Apêndice 16), o valor inicial para N foi mantido.

A análise da textura das 10 camadas de solo foi realizada com base no procedimento metodológico descrito por Gee & Bauder (1986). Para isso, quatro pontos de amostragem foram selecionados: i) parcela do LB+MI (sem N) da repetição 1; ii) parcela do AV/MI (sem N) da repetição 3; iii) campo nativo da

repetição 1 (coxilha atrás da guarita da entrada da EEA) e iv) campo nativo da repetição 3 (entre a área experimental e a estrada). Dispersou-se 40 g de amostra de solo em solução de 100 mL de H<sub>2</sub>O + 10 mL de NaOH (1 mol L<sup>-1</sup>), em snap-caps de 200 mL, contendo duas bolitas de acrílico. A suspensão foi deixada em repouso durante a noite e no dia seguinte agitada por duas horas, sendo posteriormente transferida para uma proveta de 1 L, cujo volume foi completado com água destilada. A partir dos dados de leitura no densímetro com escala de Bouyoucos, obtidos em intervalos definidos de tempo, e considerando-se a Lei de Stokes, ajustou-se uma curva logarítmica de distribuição granulométrica para estimar o teor de argila de cada amostra (Apêndice 17). O teor de areia foi avaliado através de pesagem do material retido em peneira de 53 µm. Por diferença entre os teores de areia e argila, foi obtido o teor de silte. Como as diferenças de valores analíticos entre os quatro pontos avaliados não foram expressivas, calculou-se um valor médio para cada camada, representando tanto a condição do campo nativo como a do experimento. Os dados finais dos teores de argila, silte e areia encontram-se no Apêndice 18.

### **4.3. Resultados e discussão**

As reduções nos estoques originais de C e N da camada de 0-17,5 cm do campo nativo, durante o período de manejo convencional do solo entre 1969 e 1983, foram de 8,6 Mg C ha<sup>-1</sup> (Figura 4.1a) e 0,44 Mg N ha<sup>-1</sup> (Figura 4.1c), causadas tanto pelo preparo excessivo do solo como pela baixa adição de resíduos culturais. Tais perdas corresponderam a 22% e 14% do estoque original de C e N, respectivamente, e estima-se que poderiam ser maiores caso o solo continuasse a ser manejado naquela maneira nos anos consecutivos. Para alguns solos subtropicais da Austrália manejados de forma semelhante, tais perdas chegaram a 50% do estoque original de C após 33 anos, numa condição próxima a do estado estável (Dalal & Mayer, 1986). Supondo que a perda de C durante o período tenha sido somente por oxidação microbiana, isso corresponde a emissão de 31,5 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> para a atmosfera,

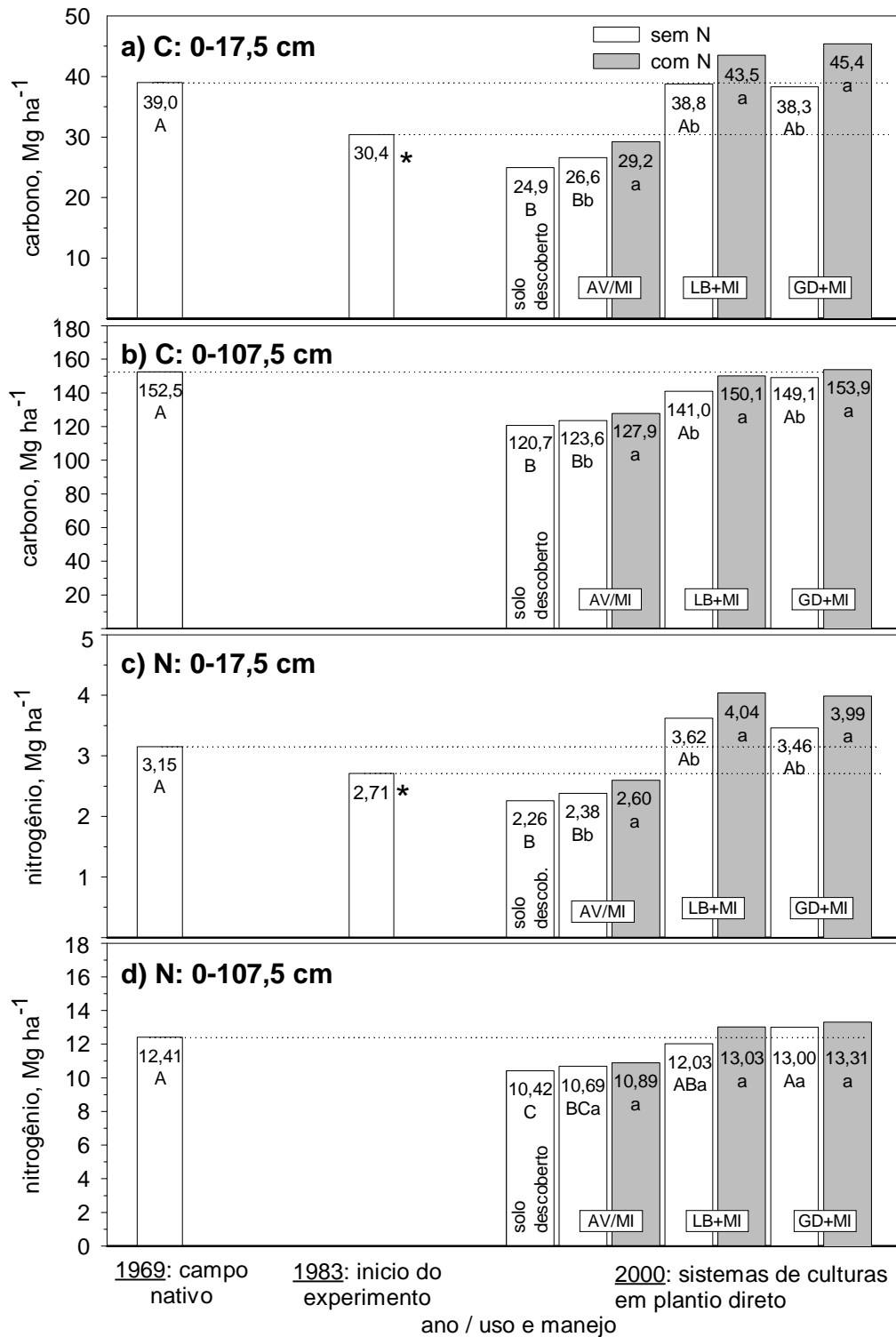


Figura 4.1. Estoques de C (a, b) e N (c, d) nas camadas de 0-17,5 cm (a, c) e 0-107,5 cm (b, d) do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Letras maiúsculas comparam os diferentes sistemas de culturas (sem N) e letras minúsculas comparam os diferentes níveis de adubação nitrogenada (nos sistemas AV/MI, LB+MI e GD+MI), através do teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Para comparar o efeito da adubação nitrogenada nos estoques de N do solo, usou-se  $P < 0,10$ . \* Dado obtido a partir de Teixeira (1988).

o que equivale a combustão de aproximadamente 11 mil litros de óleo Diesel  $\text{ha}^{-1}$  (considerando um número médio de 16 átomos de C nos hidrocarbonetos do óleo Diesel e uma densidade de  $0,9 \text{ kg dm}^{-3}$ ). Tais informações evidenciam os efeitos negativos que o manejo convencional empregado na região Sul durante a década de 70 promoveu na qualidade tanto do solo como da atmosfera, além de outros prejuízos ambientais, econômicos e sociais.

No entanto, a partir de 1983, quando o experimento foi instalado e o solo passou a ser manejado sob plantio direto, três tendências de comportamento para os estoques de C e N do solo foram observadas entre os sistemas de culturas: diminuição dos estoques nos sistemas solo descoberto e AV/MI sem N; manutenção no sistema AV/MI com N e aumento nos sistemas de culturas com leguminosas (LB+MI e GD+MI), tanto com N como sem N (Figuras 4.1a, 4.1c).

As perdas de C e N na camada de 0-17,5 cm do solo descoberto foram de  $5,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$  e  $0,45 \text{ Mg N ha}^{-1}$  desde o início do experimento, o que corresponde a 18% e 17% dos estoques iniciais de C e N em 1983, respectivamente (Figuras 4.1a, 4.1c). Enquanto isso, no sistema AV/MI sem N, onde as adições de resíduo foram superiores em relação ao solo descoberto, tais perdas diminuíram para  $3,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$  e  $0,33 \text{ Mg N ha}^{-1}$ , que correspondem a 13% e 12% dos estoques iniciais de C e N, respectivamente. No caso do solo descoberto, as perdas de C corresponderam a emissão de  $20,2 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  (~7,2 mil litros de óleo Diesel) e, no sistema AV/MI (sem N), corresponderam a  $13,9 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  (~4,9 mil litros de óleo Diesel). Estes resultados comprovam que a adoção do plantio direto não significa necessariamente a manutenção ou o aumento dos estoques de C e N do solo, pois no presente caso a adição anual de  $0,66 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  via resíduo no solo descoberto e de  $4,37 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  no solo do sistema AV/MI sem N (Bayer, 1996), foram insuficientes para contrabalançar a quantidade de C e N mineralizada anualmente. Considerando toda a camada de 0-107,5 cm, as perdas acumuladas de C no solo descoberto desde 1969, chegaram a  $31,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Figura 4.1b), equivalendo a  $116,6 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  (~41,5 mil litros de óleo Diesel), e  $1,99 \text{ Mg N ha}^{-1}$  (Figura 4.1d).

Entretanto é importante destacar o papel que a adubação nitrogenada desempenhou no sistema de culturas AV/MI em evitar a depleção

dos estoques de C e N. Neste sistema, a adubação nitrogenada manteve os estoques iniciais de C e N da camada de 0-17,5 cm praticamente constantes ao longo dos 17 anos de experimento (Figuras 4.1a, 4.1c). Essa informação destaca a importância da adubação nitrogenada como uma forma de também garantir a qualidade do solo, sendo muito relevante para a região Sul do Brasil, onde considerável parcela do cultivo de milho é realizado em sucessão à aveia preta.

Considerando que o sistema AV/MI (com N) possui os mesmos estoques de C e N do início do experimento na camada de 0-17,5 cm, o mesmo também foi assumido para a camada de 0-107,5 cm. Dessa forma, tendo AV/MI (com N) como referência das condições iniciais do experimento, as perdas ocorridas na camada de 0-107,5 cm do solo descoberto durante o período experimental foram calculadas em 7,2 Mg C ha<sup>-1</sup> e 0,47 Mg N ha<sup>-1</sup> (Figuras 4.1b, 4.1d). Considerando que a perda de C na camada de 0-17,5 cm foi de 5,5 Mg C ha<sup>-1</sup>, como visto anteriormente, isso significa que 1,7 Mg C ha<sup>-1</sup> foram perdidos de camadas abaixo de 17,5 cm de profundidade, o que equivale a aproximadamente 24% da perda total de C. Por outro lado, no sistema AV/MI (sem N), onde a perda total de C na camada de 0-107,5 cm foi calculada em 4,3 Mg C ha<sup>-1</sup>, a proporção dessa perda ocorrida abaixo de 17,5 cm de profundidade foi de aproximadamente 12% (0,5 Mg C ha<sup>-1</sup>). Esses resultados podem ser considerados como proporções significativas de perda de C, demonstrando que as camadas do subsolo podem ser importantes fontes de C-CO<sub>2</sub> quando os sistemas de culturas possuem baixa adição de resíduos.

A necessidade de considerar as camadas mais profundas do solo na avaliação do efeito de sistemas de manejo sobre a dinâmica da matéria orgânica já havia sido destacada por Mikhailova et al. (2000). Os autores observaram perdas de C e N até 100 cm de profundidade em um solo sob pousio por 50 anos, em comparação ao campo nativo, concluindo que avaliações realizadas somente nas camadas superficiais do solo (até 30 cm de profundidade) subestimam consideravelmente as perdas reais de C e N ocorridas ao longo do perfil. Entretanto, observando os valores das concentrações de C e N nas camadas abaixo de 17,5 cm de profundidade, percebe-se que não há diferença significativa entre os sistemas (Tabela 4.1), o

Tabela 4.1. Concentração de C orgânico e N total no perfil do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

camada	campo nativo	solo descoberto	AV/MI		LB+MI		GD+MI		
			---- sem N ----	---- com N ----	---- sem N ----	---- com N ----	---- sem N ----	---- com N ----	
----- carbono orgânico (g dm <sup>-3</sup> ) -----									
0 - 2,5	32,76 B <sup>1/</sup>	18,89 C	22,03 C b <sup>2/</sup>	25,86 a	45,94 A b	54,36 a	46,90 A b	54,36 a	
2,5 - 7,5	25,08 A	14,11 B	16,03 B b	17,41 a	23,00 A b	27,08 a	22,84 A b	28,29 a	
7,5 - 17,5	18,29 A	13,16 B	13,07 B a	14,03 a	15,77 AB a	16,40 a	15,17 AB a	17,68 a	
17,5 - 27,5	17,42 A	13,75 A	13,45 A a	14,02 a	14,25 A a	15,21 a	15,25 A a	15,19 a	
27,5 - 37,5	15,63 A	13,43 A	13,48 A a	13,67 a	14,42 A a	14,83 a	15,67 A a	15,05 a	
37,5 - 47,5	14,21 A	12,50 A	12,55 A a	13,29 a	13,77 A a	14,27 a	15,19 A a	14,11 a	
47,5 - 57,5	13,49 A	11,53 A	12,15 A a	11,98 a	12,77 A a	13,36 a	13,57 A a	14,34 a	
57,5 - 67,5	12,25 A	10,08 A	10,82 A a	11,44 a	12,15 A a	12,20 a	12,90 A a	13,18 a	
67,5 - 87,5	10,95 A	9,19 A	9,37 A a	9,23 a	9,43 A a	10,05 a	10,87 A a	9,96 a	
87,5 - 107,6	9,30 A	8,04 A	7,91 A a	7,91 a	8,00 A a	8,31 a	8,26 A a	8,34 a	
----- nitrogênio total (g dm <sup>-3</sup> ) -----									
0 - 2,5	2,60 B <sup>1/</sup>	1,71 C	1,94 C b <sup>2/</sup>	2,18 a	4,08 A b	4,87 a	3,75 A b	4,38 a	
2,5 - 7,5	2,09 A	1,33 B	1,49 B b	1,60 a	2,22 A b	2,56 a	2,11 A b	2,54 a	
7,5 - 17,5	1,45 A	1,17 A	1,16 A a	1,26 a	1,49 A a	1,54 a	1,46 A a	1,62 a	
17,5 - 27,5	1,32 A	1,08 A	1,10 A a	1,16 a	1,24 A a	1,37 a	1,33 A a	1,34 a	
27,5 - 37,5	1,19 A	1,03 A	1,08 A a	1,03 a	1,12 A a	1,12 a	1,25 A a	1,23 a	
37,5 - 47,5	1,04 A	0,98 A	0,99 A a	1,00 a	1,06 A a	1,11 a	1,18 A a	1,12 a	
47,5 - 57,5	1,06 A	0,97 A	0,99 A a	0,97 a	0,97 A a	1,04 a	1,11 A a	1,13 a	
57,5 - 67,5	1,01 A	0,86 A	0,90 A a	0,94 a	0,97 A a	1,01 a	1,07 A a	1,10 a	
67,5 - 87,5	0,95 A	0,83 A	0,84 A a	0,83 a	0,80 A a	0,88 a	0,97 A a	0,89 a	
87,5 - 107,6	0,86 A	0,79 A	0,78 A a	0,76 a	0,72 A a	0,79 a	0,83 A a	0,82 a	

<sup>1/</sup> Letras maiúsculas, na linha, comparam sistemas de culturas sem nitrogênio ( $P < 0,05$ , teste de Tukey).

<sup>2/</sup> Letras minúsculas, na linha, comparam níveis de adubação nitrogenada dentro de cada sistema de culturas ( $P < 0,05$ , teste de Tukey).



que a principio poderia ser interpretado como se o manejo não tivesse nenhuma influência nessas camadas. Mas mesmo assim ainda é muito difícil desconsiderar os valores absolutos que tais perdas assumem.

Ao contrário do solo descoberto e AV/MI (sem N), os sistemas de culturas com leguminosas (LB+MI e GD+MI), tanto com N como sem N, incrementaram significativamente os estoques de C e N do solo durante esses 17 anos (Figura 4.1a, 4.1c). Na camada de 0-17,5 cm, o solo do sistema LB+MI (sem N) apresentou um incremento de 8,4 Mg C ha<sup>-1</sup> (28% da quantidade inicial em 1983, equivalendo ao seqüestro de 30,8 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>) e de 0,91 Mg N ha<sup>-1</sup> (33% do inicial). Similarmente, o solo do sistema GD+MI (sem N) apresentou um aumento de 7,9 Mg C ha<sup>-1</sup> (26% do inicial), equivalendo a 29,0 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, e de 0,75 Mg N ha<sup>-1</sup> (28% do inicial). Tanto lablab como guandu são espécies leguminosas tropicais, que além de contribuírem com N as plantas de milho, também possuem elevada produção de fitomassa (Burle et al., 1997). As adições anuais de C através dos resíduos vegetais desses sistemas de culturas, sem adubação nitrogenada, foram estimadas em 6,14 Mg C ha<sup>-1</sup> para o LB+MI (sem N) e 8,89 Mg C ha<sup>-1</sup> para o GD+MI (sem N) (Bayer, 1996), sendo bem superiores as adições do solo descoberto (0,66 Mg C ha<sup>-1</sup>) e do sistema AV/MI (sem N) (4,37 Mg C ha<sup>-1</sup>). Estes resultados comprovam os benefícios das leguminosas tropicais em aumentar os estoques de MOS em solos agrícolas e melhorar a função dos mesmos como um dreno no processo de seqüestro de C atmosférico. Convém salientar que resultados similares também ocorreram quando leguminosas de clima temperado foram incluídas no sistema de culturas (Testa, 1989; Lovato, 2001)

Os sistemas LB+MI e GD+MI também propiciaram acúmulos de C e N no solo ao ponto de igualar, ou até mesmo superar, os estoques originais presentes na camada de 0-17,5 cm do campo nativo, principalmente nos tratamentos com adubação nitrogenada (Figuras 4.1a, 4.1c). Na camada de 0-2,5 cm os sistemas com leguminosa (sem N) apresentaram teores de C em média 42% superior ao observado no campo nativo (Tabela 4.1), o que se deve ao acúmulo de elevada quantidade de material oriundo da parte aérea de plantas. Nas camadas abaixo de 2,5 cm, entretanto, não houveram diferenças estatísticas entre esses sistemas e o campo nativo.

Na camada de 0-107,5 cm, os sistemas de culturas com leguminosas, exceto LB+MI (sem N), também recuperaram os estoques originais de C e N do campo nativo (Figuras 4.1b, 4.1d), embora de forma não tão expressiva como na camada de 0-17,5 cm (Figura 4.1a, 4.1c). No caso específico do sistema de culturas GD+MI (sem N), o ganho total de C na camada de 0-107,5 cm desde o início do experimento (tendo AV/MI com N como referência) foi de 21,2 Mg C ha<sup>-1</sup> (equivalendo a 77,7 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>) (Figura 4.1b). Considerando que o acúmulo na camada de 0-17,5 cm foi de 7,9 Mg C ha<sup>-1</sup> (Figura 4.1a), pode-se estimar que 63% do acúmulo de C na camada de 0-107,5 cm ocorreu em profundidades abaixo dos 17,5 cm. Para os sistemas GD+MI (com N), LB+MI (sem N) e LB+MI (com N), a proporção de C acumulado abaixo dos 17,5 cm de profundidade foi 42%, 36% e 41%, respectivamente. É provável que esse acúmulo de C em camadas mais profundas do solo esteja relacionado com a contribuição direta do sistema radicular. Outra causa desse acúmulo pode ser o transporte de resíduos vegetais a partir da superfície, feito por organismos da meso e macrofauna do solo, os quais supostamente estariam sendo favorecidos pelas melhores condições ambientais oferecidas pelas plantas de guandu e lablab (disponibilidade de resíduos, temperaturas mais constantes, umidade, proteção contra radiação solar, etc). Este acúmulo de matéria orgânica no subsolo provavelmente aumentará com o passar do tempo, enfatizando ainda mais a importância que as camadas subsuperficiais do solo podem assumir no processo de seqüestro de C atmosférico (Swift, 2001).

As taxas anuais de acúmulo de C nos sistemas de culturas com leguminosas variaram entre 0,49 e 0,88 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, na camada de 0-17,5 cm e entre 0,77 e 1,53 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, na camada de 0-107,5 cm, sendo que os valores mais baixos ocorreram nos tratamentos sem adubação nitrogenada (Tabela 4.2). Na camada de 0-17,5 cm se considerou como a referência para o cálculo dessa taxa o estoque de C no início do experimento (30,4 Mg C ha<sup>-1</sup>), enquanto que na camada de 0-107,5 cm a referência para o cálculo foi o sistema AV/MI (com N). Bayer et al. (2000b) encontraram uma taxa de acúmulo de 1,33 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no sistema aveia+vica/milho+caupi, também na camada de 0-17,5 cm, nos primeiros 9 anos de plantio direto. A maior taxa de acúmulo de C encontrada por esses autores pode ser explicada pelo fato do

sistema aveia/milho em preparo convencional ter sido usado como referência para o cálculo da taxa. Com isso, não só o acúmulo promovido pelo sistema aveia+vica/milho+caupi em plantio direto esta sendo computado, mas também a perda promovida pelo sistema aveia/milho em preparo convencional. Sá et al. (2001) obtiveram taxas de acúmulo de  $0,81 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , na camada de 0-20 cm, e  $0,99 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , na camada de 0-40 cm de um Latossolo argiloso sob plantio direto por 22 anos e cultivado com uma rotação envolvendo soja e milho no verão e trigo e plantas de cobertura no inverno. Todas essas informações ressaltam o fato de que solos sob plantio direto possuem um grande potencial de seqüestrar C atmosférico, especialmente quando associado com sistemas de culturas onde leguminosas estão incluídas.

Tabela 4.2. Acúmulo absoluto e taxa anual de acúmulo de C nas camadas de 0-17,5 cm e 0-107,5 cm do solo dos sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada.

Sistema de culturas	0-17,5 cm <sup>1/</sup>		0-107,5 cm <sup>2/</sup>	
	acúmulo absoluto (Mg C ha <sup>-1</sup> )	taxa de acúmulo (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	acúmulo absoluto (Mg C ha <sup>-1</sup> )	taxa de acúmulo (Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
solo descoberto	-5,5	-0,32	-7,2	-0,42
AV/MI (sem N)	-3,8	-0,22	-4,3	-0,25
AV/MI (com N)	0,0 <sup>3/</sup>	0,00 <sup>3/</sup>	0,0 <sup>3/</sup>	0,00 <sup>3/</sup>
LB+MI (sem N)	8,4	0,49	13,1	0,77
LB+MI (com N)	13,1	0,77	22,2	1,31
GD+MI (sem N)	7,9	0,46	21,2	1,25
GD+MI (com N)	15,0	0,88	26,0	1,53

<sup>1/</sup> Para o cálculo do acúmulo absoluto e da taxa anual de acúmulo de C na camada de 0-17,5 cm, utilizou-se como referência o estoque de C presente no início do experimento ( $30,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ).

<sup>2/</sup> Para o cálculo do acúmulo absoluto e da taxa anual de acúmulo de C na camada de 0-107,5 cm, utilizou-se como referência o estoque de C presente no sistema de culturas AV/MI (com N), considerando que o mesmo representa as condições iniciais do experimento.

<sup>3/</sup> Arbitrariamente definido como zero, pois este sistema foi usado como referência para representar os estoques iniciais de C do experimento.

Atualmente ainda existem dúvidas e divergências sobre qual condição deveria ser usada como referência para os cálculos de taxa de acúmulo (seqüestro) de C. Alguns trabalhos consideram como referência o estoque inicial de C, quando o sistema de manejo é implantado (Sá et al., 2001), enquanto outros consideram como referência o estoque de C do solo manejado convencionalmente (Bayer et al., 2000b). No presente estudo se optou pelo estoque de C presente no início do experimento.

Com relação aos efeitos da adubação nitrogenada, observou-se um incremento médio nos estoques de C e N da camada de 0-17,5 cm de 11,4% no sistema LB+MI e 16,9% no GD+MI (Figura 4.1a, 4.1c). No sistema AV/MI, os estoques de C e N desta camada foram em torno de 9,5% superiores no tratamento com adubação nitrogenada. Esse incremento nos estoques de C e N devido a adubação nitrogenada mesmo nos sistemas de culturas com leguminosas pode estar associado com alguma condição mais favorável ao desenvolvimento do milho, como por exemplo maior disponibilidade de água em função da cobertura morta mais densa, ou pode ser ainda devido a utilização do N-fertilizante pelas próprias plantas leguminosas, resultando em um incremento na produção de fitomassa.

Esses incrementos nos estoques de C e N promovidos pela adubação nitrogenada foram relativamente maiores em comparação aos obtidos em outros estudos também com solos subtropicais. Em função da adubação nitrogenada, o estoque de C na camada de 0-17,5 cm foi 6,8% e 5,0% superior nos sistemas de culturas aveia/milho e aveia+vica/milho+caupi, respectivamente, após 13 anos sob plantio direto, na mesma área experimental deste estudo (Lovato, 2001). Para um Vertissolo australiano sob o sistema de culturas trigo/pousio, o estoque de C na camada de 0-10 cm foi 5,9% superior quando se realizou a adubação nitrogenada (Dalal, 1989).

No passado, acreditava-se que a aplicação de N reduzisse os estoques de MOS por estimular sua mineralização, conforme relato de Janzen et al., (1997). Essa idéia já não é mais aceita, pois embora a mineralização possa até ser maior, ela é compensada pela maior adição de resíduos ao solo (Campbell et al., 1991a; Gregorich et al., 1996). Porém é possível que a adubação nitrogenada não promova nenhum incremento nos estoques de C e N, especialmente em solos que naturalmente possuem elevados teores de matéria orgânica, como observado no caso de alguns Chernossolos (Campbell et al., 1991b).

Com referência a alguns aspectos qualitativos da MOS, expressos através de sua relação C:N, observou-se, de maneira geral, somente pequenas diferenças entre os sistemas de culturas e entre os níveis de adubação nitrogenada (Tabela 4.3). Existe porém uma tendência do solo de campo nativo apresentar maior relação C:N do que o solo dos sistemas de culturas (Tabela

4.3), o que pode estar associado a dois fatores. O primeiro seria uma preservação seletiva de N em relação ao C, nos anos de cultivo convencional do solo entre 1969-83. Nesse caso, durante o processo de mineralização, o C é liberado para a atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$ , enquanto que a forma inorgânica de  $\text{N-NH}_4^+$ , bem como o produto de sua oxidação ( $\text{N-NO}_3^-$ ), tendem a permanecer no solo e serem reciclados pelos vegetais, sendo somente uma parte removida via colheita e lixiviação. O segundo fator seria a maior relação C:N da matéria orgânica particulada no campo nativo em relação a dos sistemas de culturas, como será visto no Estudo II (Tabela 5.5).

Significativas mudanças na relação C:N foram observadas ao longo do perfil do solo, com a mesma tendência para todos os sistemas de culturas e níveis de adubação nitrogenada (Tabela 4.3 e Figura 4.2). A relação C:N diminuiu a partir da superfície (média de 11,8 : 1), onde se concentram os resíduos da parte aérea de plantas, para a camada de 2,5-7,5 cm (média de 10,9 : 1). Abaixo dessa, teve um aumento até a camada de 37,5-47,5 cm (média de 13,0 : 1), tornando a diminuir novamente até a profundidade de 107,5 cm (média de 10,4 : 1) (Figura 4.2). Comportamento similar da relação C:N do solo até a profundidade de 30 cm também foi observado por Pillon (2000), em sistemas de culturas do mesmo experimento deste estudo. No caso também ocorreu um aumento da relação C:N a partir da superfície do solo até essa profundidade, atribuído a uma possível maior relação lignina/N do sistema radicular em comparação a parte aérea de plantas (Pillon, 2000; Balesdent & Balabane, 1996).

Entretanto, o fato intrigante é que a relação C:N atinge um valor máximo na camada intermediária de 37,5-47,5 cm e torna a diminuir nas camadas abaixo. Além de poder estar relacionado com a maior relação lignina/N do sistema radicular em comparação a parte aérea de plantas (Pillon, 2000), é provável que esse incremento da relação C:N seja devido ao aumento do teor de argila em profundidade (Figura 4.2), associado com a maior relação C:N dessa fração física na camada de 37,5-47,5 cm. A maior relação C:N na fração argila na camada de 37,5-47,5 cm em relação as camadas superficiais é demonstrada na Tabela 5.5 do Estudo II. É provável que compostos orgânicos solúveis de elevada relação C:N, como ácidos

Tabela 4.3. Relação C:N ao longo do perfil do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

camada	campo nativo	solo descoberto	AV/MI		LB+MI		GD+MI	
			---- sem N ----	--- com N ----	---- sem N ----	---- com N ----	---- sem N ----	--- com N ----
0 - 2,5	abc <sup>1/</sup> 12,7 A <sup>2/</sup>	bc 11,0 B	bcd 11,4 AB a <sup>3/</sup>	11,9 a	de 11,3 AB a	11,2 a	ab 12,5 A a	12,4 a
2,5 - 7,5	bcd 12,1 A	bc 10,6 B	d 10,8 AB a	10,9 a	e 10,4 B a	10,6 a	def 10,8 AB a	11,1 a
7,5 - 17,5	abc 12,6 A	bc 11,3 AB	bcd 11,3 AB a	11,2 a	de 10,6 B a	10,7 a	ef 10,4 B a	10,9 a
17,5 - 27,5	ab 13,2 A	a 12,7 AB	abc 12,2 AB a	12,1 a	cde 11,5 B a	11,1 a	bcde 11,5 B a	11,4 a
27,5 - 37,5	ab 13,1 A	a 13,0 A	ab 12,5 A a	13,2 a	ab 13,0 A a	13,3 a	ab 12,5 A a	12,3 a
37,5 - 47,5	a 13,7 A	a 12,8 A	a 12,7 A a	13,3 a	ab 13,0 A a	12,8 a	a 12,9 A a	12,6 a
47,5 - 57,5	abc 12,7 A	ab 11,9 A	abc 12,3 A a	12,4 a	a 13,3 A a	12,9 a	abc 12,3 A a	12,7 a
57,5 - 67,5	bc 12,2 A	ab 11,8 A	abc 12,1 A a	12,2 a	abc 12,6 A a	12,1 a	abcd 12,0 A a	12,0 a
67,5 - 87,5	cd 11,6 A	bc 11,2 A	cd 11,2 A a	11,2 a	bcd 11,8 A a	11,4 a	cdef 11,2 A a	11,3 a
87,5 - 107,6	d 10,8 A	c 10,2 A	d 10,2 A a	10,5 a	de 11,1 A a	10,6 a	f 10,0 A a	10,2 a

<sup>1/</sup> Letras minúsculas, na mesma coluna, comparam camadas de solo ( $P < 0,05$ , teste de Tukey),

<sup>2/</sup> Letras maiúsculas, na mesma linha, comparam sistemas de culturas sem nitrogênio ( $P < 0,05$ , teste de Tukey),

<sup>3/</sup> Letras minúsculas, na mesma linha, comparam níveis de adubação nitrogenada, dentro de cada sistema de culturas ( $P < 0,05$ , teste de Tukey),

orgânicos, tenham lixiviado e acumulado nesta camada, onde o maior teor de argila possivelmente obstruiu o fluxo descendente de tais compostos. Como não existe uma clara evidência de que este comportamento da relação C:N ao longo do perfil tenha sido influenciado pelo manejo do solo, é possível concluir que este fato é resultado de algum processo pedogênico ocorrido ao longo de um tempo de escala geológica.

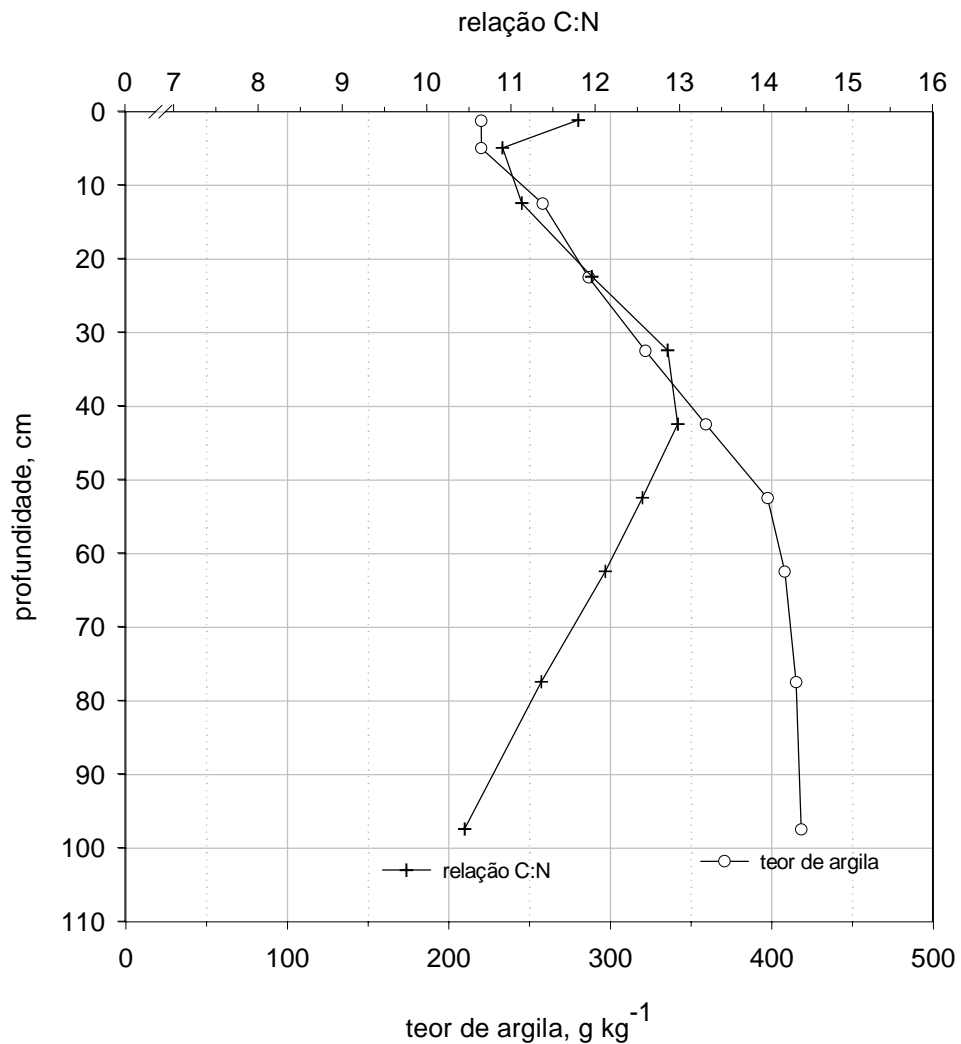


Figura 4.2. Relação C:N média de todos os tratamentos (com e sem N) e teor médio de argila ao longo do perfil do solo.

#### **4.4. Conclusões**

A adoção do plantio direto sem um sistema de culturas com adições satisfatórias de resíduo não significa necessariamente a manutenção ou o incremento dos estoques de matéria orgânica do solo.

A inclusão de espécies leguminosas estivais nos sistemas de culturas incrementa os estoques de matéria orgânica do solo e de promove o seqüestro de C-CO<sub>2</sub> atmosférico.

A adubação nitrogenada mantém ou incrementa os estoques de matéria orgânica em solos sob plantio direto.

As camadas subsuperficiais do solo em plantio direto (abaixo dos 17,5 cm de profundidade) são importantes reservatórios de matéria orgânica, os quais podem atuar tanto como fonte ou como dreno de C-CO<sub>2</sub> atmosférico, dependendo do sistema de culturas empregado.



## **5. ESTUDO II**

### **Estoque de C e N em frações físicas do solo definidas por sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto**

#### **5.1. Introdução**

As alterações que um determinado sistema de manejo causa nos estoques totais de C e N do solo fornecem relevantes subsídios para definir se tal sistema promove ou não a qualidade do solo. Entretanto, quando se pretende conhecer de forma mais detalhada a dinâmica dessas alterações e quais são suas implicações sobre alguns aspectos da estabilidade da matéria orgânica do solo, um estudo mais detalhado das frações orgânicas é necessário.

É considerável o volume de informações que tratam sobre a influência de sistemas de manejo sobre os estoques totais de matéria orgânica do solo (MOS) em ambientes subtropicais. Por outro lado, o conhecimento relativo as alterações que o manejo do solo, mais especificamente os sistemas de culturas e a adubação nitrogenada em plantio direto, causam nos estoques e na distribuição de C e N das frações físicas do solo ainda é reduzido. Por isso, dados complementares necessitam ser gerados para ampliar tal conhecimento e chegar a conclusões mais concretas sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo em regiões subtropicais.

Possivelmente informações obtidas a partir do fracionamento físico também possam ser utilizadas para o cálculo de índice de manejo de carbono (IMC), proposto inicialmente por Blair et al. (1995). Nesse caso, a matéria orgânica particulada (MOP) seria considerada como a fração lábil, em substituição àquela atacada por  $\text{KMnO}_4$ . Com isso seria possível definir, a partir de um trabalho de fracionamento físico, se um determinado sistema de manejo

está contribuindo para a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema de produção agrícola.

Outro ponto importante que diz respeito as frações físicas do solo é a capacidade finita dessas em estocar matéria orgânica. Ainda existem controvérsias com relação a esse assunto, com uma corrente de pesquisadores defendendo a idéia de que as frações possuem uma capacidade finita de estocar matéria orgânica, enquanto outra corrente acredita no contrário. Em função disso, estudos adicionais necessitam ser realizados com o intuito de se obter mais informações que possam elucidar o tema.

Este estudo baseia-se nas seguintes hipóteses:

- As alterações que os sistemas de culturas sob plantio direto e a adubação nitrogenada promovem nos estoques totais de matéria orgânica do solo são refletidas nas respectivas frações físicas, sendo maiores em termos relativos na matéria orgânica particulada (MOP) e maiores em termos absolutos na fração associada aos minerais (fração argila).
- O solo possui uma capacidade finita de estocar matéria orgânica associada aos minerais (fração argila).

Os objetivos deste estudo foram:

- avaliar as alterações absolutas e relativas que os sistemas de culturas e a adubação nitrogenada em plantio direto promovem sobre os estoques de C e N das frações físicas do solo;
- avaliar a proporção que cada fração física representa do estoque total de C e N do solo;
- verificar a possibilidade de emprego de dados do fracionamento físico para o cálculo de índice de manejo de carbono (IMC);
- avaliar a capacidade de acúmulo de C e N nas frações físicas.

## **5.2. Material e métodos**

### **5.2.1. Experimento de campo e coleta de amostras de solo**

As informações referentes ao experimento de campo e procedimentos de coleta e preparo de amostras de solo encontram-se descritas no capítulo 3 (Material e Métodos Geral).

### **5.2.2. Tratamentos avaliados**

Foram avaliados o campo nativo e os seguintes sistemas de culturas: solo descoberto, AV/MI (sem N), AV/MI (com N), LB+MI (sem N), LB+MI (com N), GD+MI (sem N) e GD+MI (com N). Porém das 10 camadas de solo amostradas, somente três foram incluídas no presente estudo: 0-2,5, 2,5-7,5 e 37,5-47,5 cm. O objetivo de se incluir esta última camada foi o de investigar alguns aspectos relacionados com a dinâmica de C e N nas frações físicas do subsolo.

### **5.2.3. Fracionamento físico do solo e análises elementares de C e N**

Três frações físicas de solo foram obtidas: matéria orgânica particulada (MOP) ( $> 63 \mu\text{m}$  e  $d < 1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ ), fração silte ( $63-2 \mu\text{m}$ ) e fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ). As amostras de solo foram dispersas através de agitação e sonicação e as frações físicas separadas por peneiração, flotação e sedimentação gravitacional. O método de fracionamento empregado está representado na Figura 5.1. Inicialmente, 30 g de uma amostra de solo composta a partir das três repetições de campo foram colocados num recipiente plástico de 200 mL, junto com 100 mL de água destilada. Após 1h em repouso para a completa saturação da amostra, esta foi agitada circularmente (250 rpm), pelo mesmo período de tempo, com o objetivo de dispersar os agregados  $> 63 \mu\text{m}$  e liberar a MOP, minimizando a fragmentação e a distribuição dessa em frações de menor tamanho (Balesdent et al., 1991). A suspensão foi passada numa peneira de  $63 \mu\text{m}$  para separar a fração tamanho areia, a qual foi posteriormente submetida ao fracionamento por densidade

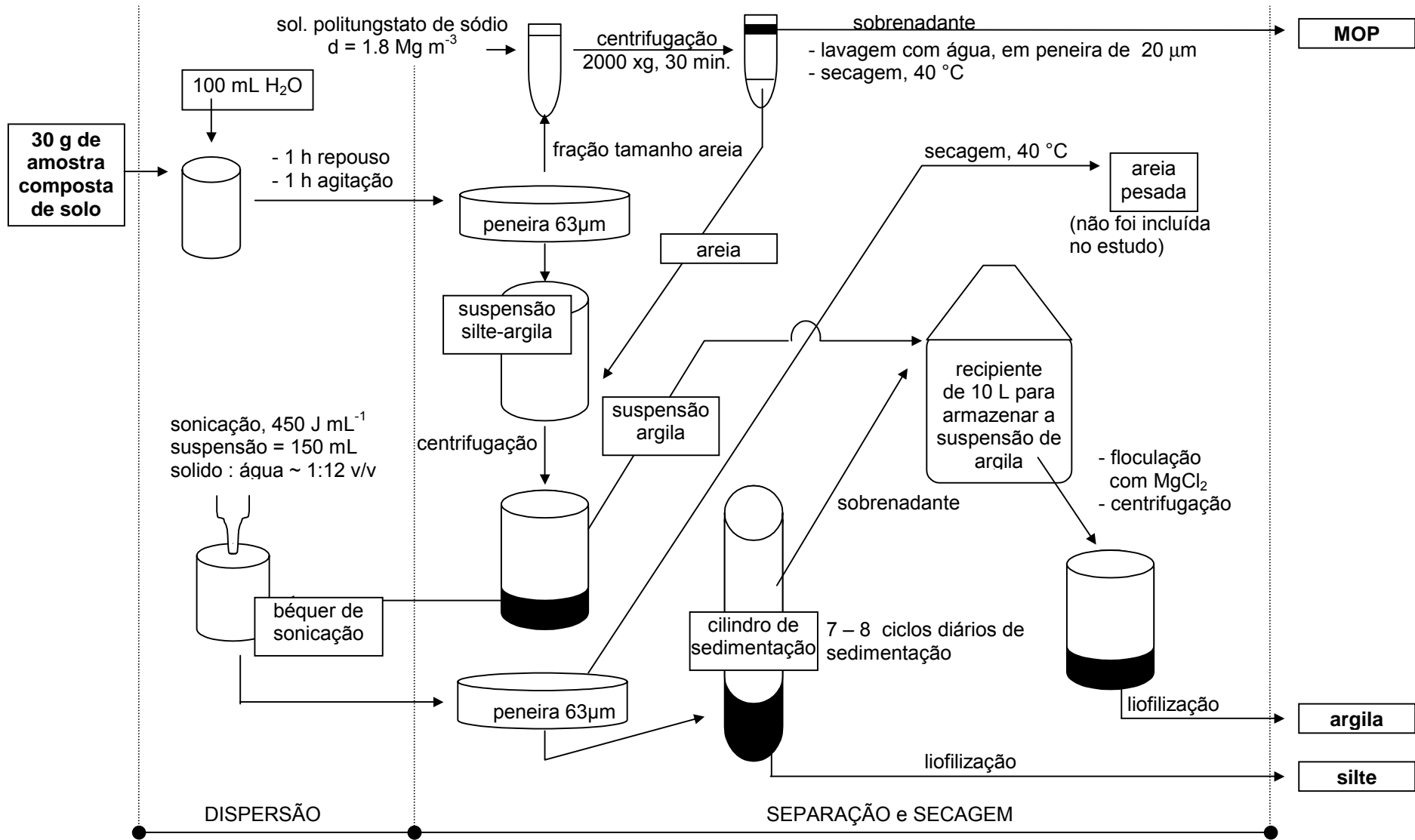


Figura 5.1. Esquema do fracionamento físico das amostras de solo.

numa solução de politungstato de sódio com densidade de  $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ , de onde se obteve duas frações: a MOP ( $d < 1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e a fração areia pesada ( $d > 1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ ). A razão de se aplicar este fracionamento densimétrico sobre a fração de tamanho areia foi a de isolar a MOP, a qual foi analisada por RMN- $^{13}\text{C}$  (Estudo III). Como as partículas da fração areia pesada apresentavam um recobrimento de argila, estas foram adicionadas junto a suspensão de silte-argila ( $< 63 \mu\text{m}$ ) para serem sonicadas. Antes da sonicação, porém, essa suspensão, cujo volume era em torno de 1L, foi centrifugada a fim de concentrar a amostra. O sobrenadante que certamente continha somente partículas  $< 2 \mu\text{m}$  não foi sonicado e sim transferido diretamente para um reservatório maior. O material sólido que se acumulou no fundo do recipiente após a centrifugação foi transferido para o béquer de sonicação, cujas paredes eram resfriadas com água corrente. O volume foi ajustado para 150 mL, de forma que a razão sólido : solução foi de  $\sim 1:12 \text{ v/v}$ . Aplicou-se uma energia de sonicação equivalente a  $450 \text{ J mL}^{-1}$ , a qual foi eficiente em dispersar amostras de solo ainda mais argilosas, como demonstrado previamente em testes laboratoriais e, além disso, a distribuição do tamanho de partículas obtida após a sonicação foi comparável àquela obtida após a análise textural padrão, com dispersão por NaOH (Gee & Bauder, 1986) (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Distribuição do tamanho de partículas em função da dispersão por sonicação ( $450 \text{ J mL}^{-1}$ ) e por dispersante químico (NaOH).

camada	areia	silte	argila
-- cm --	----- dispersão por sonicação <sup>1/</sup> (%) -----		
0-2,5	54,1 ± 1,8	22,8 ± 1,2	21,8 ± 0,8
2,7-7,5	53,7 ± 0,7	22,2 ± 0,4	22,9 ± 0,4
37,5-47,5	43,1 ± 2,0	18,0 ± 0,8	37,6 ± 1,8
	----- dispersão por NaOH <sup>2/</sup> (%) -----		
0-2,5	53,6 ± 2,0	24,3 ± 2,5	22,1 ± 0,5
2,7-7,5	54,7 ± 1,4	23,3 ± 2,1	22,0 ± 0,8
37,5-47,5	46,0 ± 2,3	18,1 ± 1,8	35,9 ± 1,8

<sup>1/</sup> Refere-se à média de todos os tratamentos. Os dados originais estão no Apêndice 19. A fração MOP foi incluída dentro da classe areia.

<sup>2/</sup> A metodologia utilizada foi uma adaptação do método de Gee & Bauder (1986), estando os detalhes descritos no Estudo I. Os dados originais estão no Apêndice 18.

Após a sonicação, foi feita uma nova peneiração (63  $\mu\text{m}$ ) para separar a areia da fração silte+argila. Para separar as partículas de silte e argila, a suspensão foi submetida a 7-8 ciclos diários de sedimentação gravitacional, em cilindros de acrílico, mantidos sob temperatura constante de 21 °C. Para o cálculo do tempo de sedimentação, considerou-se a Lei de Stokes. As frações silte e argila foram liofilizadas e acondicionadas em recipientes plásticos.

As análises elementares de C e N das frações físicas foram realizadas em analisador CN, modelo Vario EL. Os valores de concentração de C e N das frações, originalmente expressos em massa/massa ( $\text{g kg}^{-1}$  de fração) (Apêndice 19), foram convertidos para massa/volume de solo ( $\text{g dm}^{-3}$  de solo), considerando-se a proporção da massa total correspondente a cada fração (Apêndice 19) e a densidade do solo (Apêndice 1). A fração areia pesada não foi incluída no estudo devido suas baixas concentrações de C ( $< 1,0 \text{ g kg}^{-1}$ ) e N ( $< 0,15 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Apêndice 19), que estão fora da faixa de confiabilidade do aparelho. A percentagem de recuperação de massa da amostra após o fracionamento físico foi superior a 98%, enquanto que a recuperação de C e N foi de no mínimo 88% (Tabela 5.2), com valores comparáveis ao da literatura (Christensen, 1992). As análises elementares foram realizadas em duplicatas. Todo o trabalho de fracionamento físico foi realizado no Departamento de Solos da Universidade Técnica de Munique, Alemanha.

Considerando-se os dados de fracionamento físico e o estoque total de C, calculou-se o IMC para cada sistema de culturas, a partir de adaptações da proposta original de Blair et al. (1995). Nesse caso, considerou-se a MOP e a fração silte (por também possuir material particulado) como representando a porção lábil da matéria orgânica e a fração argila como a porção não-lábil.

#### **5.2.4. Microscopia ótica**

Com o objetivo de identificar e examinar fragmentos de MOP, as frações físicas do solo foram submetidas a microscopia ótica, num microscópio Olympus CH30, com luz transmitida, do Departamento de Solos da UFRGS.

Tabela 5.2. Recuperação de massa, C e N após o fracionamento físico das amostras.

tratamento	recuperação de massa	recuperação de C	recuperação de N
----- 0-2,5 cm (%) -----			
campo nativo	98,7	93,3	102,1
solo descoberto	98,3	96,1	102,4
AV/MI (sem N)	98,8	93,2	104,1
AV/MI (com N)	98,8	93,4	102,0
LB+MI (sem N)	98,3	91,7	93,0
LB+MI (com N)	98,3	90,4	91,2
GD+MI (sem N)	98,3	88,3	90,1
GD+MI (com N)	98,3	89,1	91,8
----- 2,5-7,5 cm (%) -----			
campo nativo	99,2	86,6	96,1
solo descoberto	98,7	96,3	106,6
AV/MI (sem N)	99,2	92,7	103,6
AV/MI (com N)	99,0	97,5	112,0
LB+MI (sem N)	99,0	92,1	97,9
LB+MI (com N)	98,7	87,7	95,0
GD+MI (sem N)	99,3	94,0	100,7
GD+MI (com N)	98,2	91,3	97,6
----- 37,5-47,5 cm (%) -----			
campo nativo	99,2	95,2	128,7
solo descoberto	97,4	93,9	121,7
AV/MI (sem N)	99,1	98,8	126,1
AV/MI (com N)	99,2	97,1	122,2
LB+MI (sem N)	99,0	95,6	111,3
LB+MI (com N)	98,1	99,0	122,2
GD+MI (sem N)	98,9	95,1	113,7
GD+MI (com N)	98,4	101,5	121,7

### 5.3. Resultados e discussão

#### 5.3.1. Estoques de C e N nas frações físicas e índice de manejo de carbono (IMC)

O comportamento dos estoques de C e N nas frações físicas entre os tratamentos (Figura 5.2) foi semelhante ao observado no solo integral (Tabela 4.1, Estudo I). A exceção foi na fração argila da camada de 0-2,5 cm do sistema GD+MI (Figuras 5.2a, 5.2d), cujos estoques de C e N ainda não superaram aos do campo nativo, como ocorrido para o solo integral (Tabela 4.1, Estudo I). As três frações físicas do solo das duas camadas superficiais nos sistemas de culturas solo descoberto e

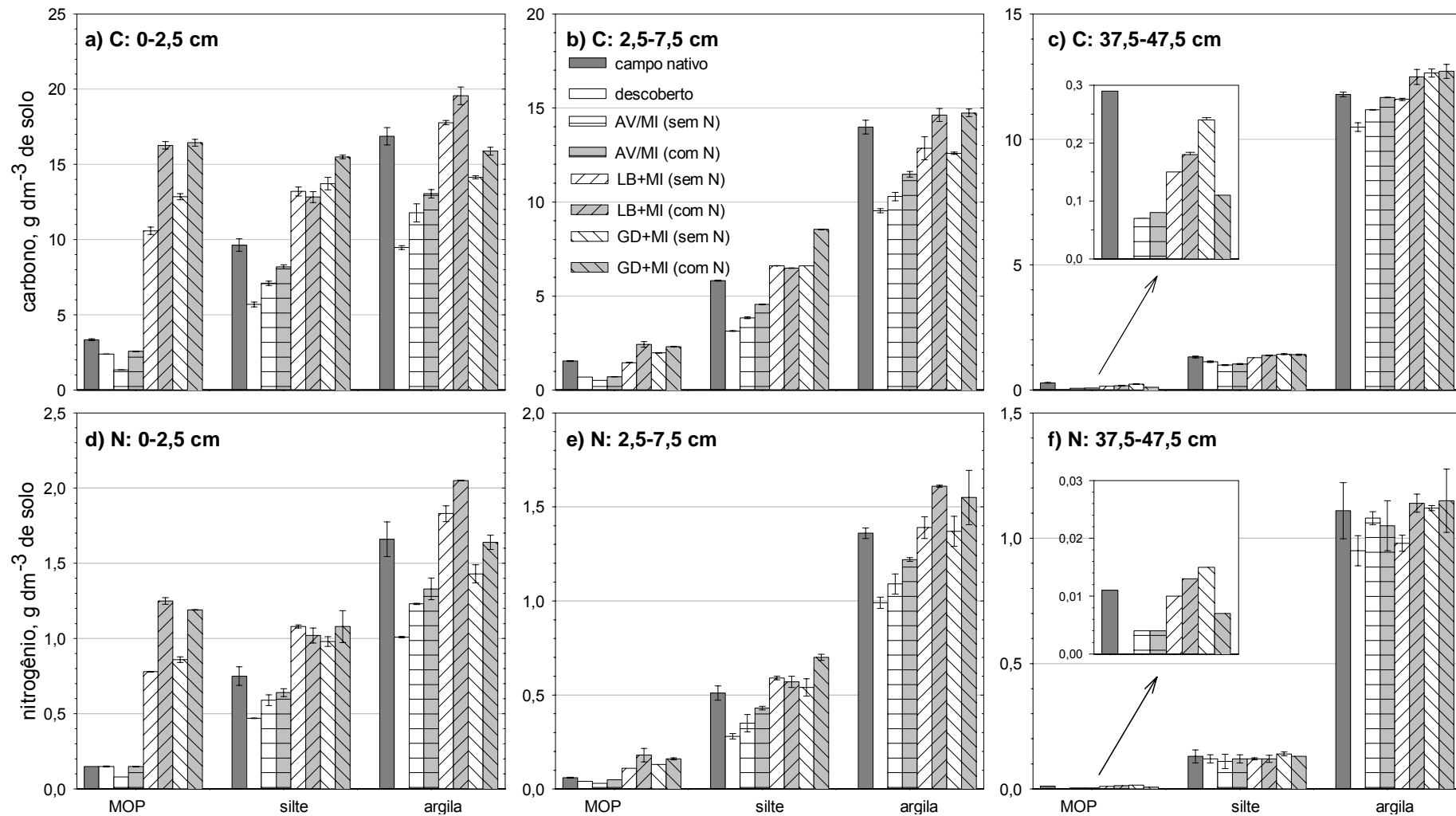


Figura 5.2. Estoques de C (a,b,c) e N (d,e,f) nas frações físicas MOP, silte e argila nas camadas de 0-2,5 cm (a,d), 2,5-7,5 cm (b,e) e 37,5-47,5 cm (e,f) do solo de campo nativo e sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Barras de erro correspondem ao desvio padrão.



AV/MI (sem N e com N) apresentaram menores estoques de C e N em relação ao campo nativo, LB+MI (sem N e com N) e GD+MI (sem N e com N) (Figuras 5.2a, 5.2b, 5.2d, 5.2e), refletindo as adições de resíduo de cada sistema de culturas.

Na camada de 37,5-47,5 cm, essa mesma tendência entre os tratamentos ocorreu para os estoques de C (Figura 5.2c). Para os estoques de N, entretanto, praticamente não ocorreram diferenças na fração silte e, na fração argila, a tendência não é muito clara (Figura 5.2f). Na MOP, observa-se um maior estoque de C no campo nativo, provavelmente devido a maior contribuição do sistema radicular. Entre os sistemas de culturas, a quantidade de C e N na MOP dos sistemas com leguminosas (LB+MI e GD+MI) é maior do que a dos sistemas AV/MI e solo descoberto.

Os estoques de C e N da MOP dos sistemas LB+MI e GD+MI na camada de 0-2,5 cm (Figuras 5.2a, 5.2d) superaram em pelo menos três vezes os correspondentes estoques no campo nativo, no solo descoberto e no sistema AV/MI (sem e com N). Embora a maior adição de resíduos pelos sistemas com leguminosas seja a principal causa de tal resultado, também é importante considerar o fato de que a amostragem de solo nos sistemas GD+MI e LB+MI foi feita no mês de agosto, quando se tinha uma elevada quantidade de resíduos sobre a superfície do solo. Por sua vez o sistema AV/MI foi amostrado em maio, quando grande parte do resíduo de aveia do ano anterior já estava decomposta, com possíveis reflexos na diminuição da quantidade de MOP.

Comparado com o campo nativo, que representada as condições originais de solo, os sistemas LB+MI e GD+MI (sem N e com N) além de recuperarem os estoques originais de C e N na MOP, também recuperaram na fração silte das duas camadas superficiais do solo (Figura 5.2a, 5.2b, 5.2d, 5.2e). Entretanto, na fração argila, onde a taxa de ciclagem da matéria orgânica é menor (Balesdent, 1996), essa recuperação não ocorreu para os estoques de C e N no sistema GD+MI (sem N e com N) da camada de 0-2,5 cm (Figura 5.2a, 5.2d) e para o estoque de C nos sistemas LB+MI e GD+MI (sem N) da camada de 2,5-7,5 cm (Figura 5.2b). Espera-se, porém, que com o decorrer do tempo, a recuperação se complete também para esses casos, assim como já ocorreu nas frações mais grosseiras (MOP e silte).

Na fração argila da camada de 0-2,5 cm, o estoque de C e N no sistema LB+MI (sem N e com N) foi maior em relação ao GD+MI, com uma significativa recuperação dos estoques originais do campo nativo (Figura 5.2a, 5.2d). Para interpretar esse fato, é necessário perceber que ele não ocorreu nas camadas mais profundas e nem nas frações mais grosseiras. Isso leva a crer que tenha ocorrido um acúmulo quase que direto de material orgânico a partir do resíduo da parte aérea de lablab para a fração argila da camada de 0-2,5 cm, sem seguir a seqüência normal de decomposição (MOP → silte → argila), segundo Baldock et al. (1992). Nesse caso, uma maior labilidade do resíduo de lablab teria permitido um ataque microbiano mais intenso, cujos produtos como exudatos e mucilagens são acumulados diretamente na fração argila (Oades et al., 1988). Outra possibilidade também seria uma passagem direta de compostos orgânicos solúveis do resíduo de lablab para a fração argila, porém numa magnitude menor em relação ao processo anterior.

Com relação a adubação nitrogenada, percebe-se um maior estoque de C e N nas frações físicas das camadas superficiais dos sistemas que receberam N fertilizante (Figura 5.2a, 5.2b, 5.2d, 5.2e), refletindo a maior adição de resíduos por estes. A exceção foi na fração silte do sistema LB+MI, onde praticamente não houveram diferenças nos estoques em função da aplicação de N (Figura 5.2a, 5.2b, 5.2d, 5.2e).

Entre as frações físicas, a MOP foi constituída basicamente por resíduos parcialmente decompostos de plantas e de hifas de fungos (observação em lupa). Também na fração silte foi possível observar a ocorrência de material orgânico particulado, como no caso do sistema GD+MI (sem N) (Figura 5.3), demonstrando que essa fração não é constituída unicamente por matéria orgânica associada com minerais, como algumas vezes é referido. Em função do fracionamento densimétrico não ter sido empregado antes da separação por tamanho, o material orgânico particulado menor que 63  $\mu\text{m}$  não foi removido, sendo acumulado na fração de tamanho silte e, provavelmente, também na fração de tamanho argila. A presença de matéria orgânica particulada na fração silte (50-2  $\mu\text{m}$ ) de um solo de cerrado e na fração argila grossa (2-0,2  $\mu\text{m}$ ) de um solo sob floresta temperada também foi observada por Neufeldt et al. (2002) e Tiessen & Stewart (1983), respectivamente. A partir de cálculos realizados com os dados originais de

Baldock et al. (1992), para alguns Oxisolos e Molisolos da Austrália e China, observou-se que mais de 85% do C orgânico contido na fração granulométrica silte correspondeu a fração leve ( $d < 2,0 \text{ Mg m}^{-3}$ ), evidenciando mais uma vez a presença de material orgânico particulado nessa fração.

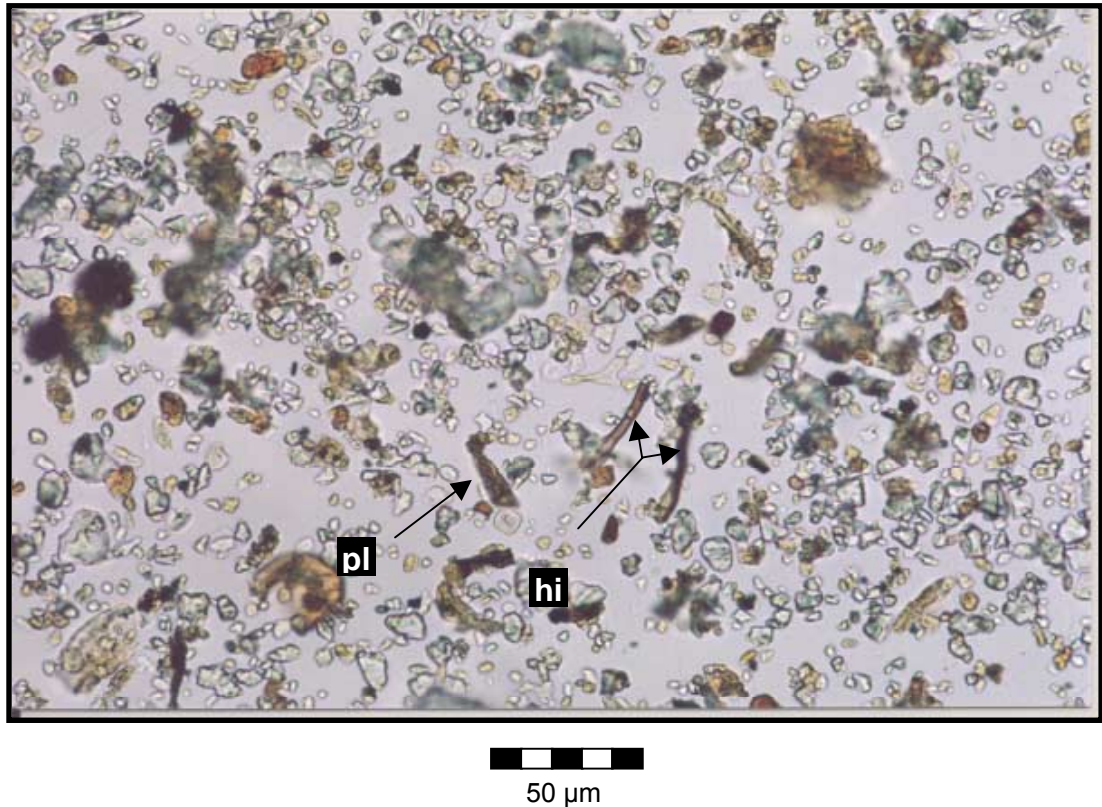


Figura 5.3. Micrografia da fração tamanho silte da camada de 0-2,5 cm do sistema de culturas GD+MI (sem N). pl = fragmentos de planta; hi = fragmentos de hifas.

Considerando que a fragmentação do material orgânico particulado de tamanho areia durante o fracionamento foi mínima, pois inicialmente se utilizou uma dispersão mais branda por agitação mecânica e não por sonicação, acredita-se que este material particulado na fração silte esteja naturalmente presente no solo com esse tamanho, como resultado de um processo mais avançado de decomposição.

Com relação a distribuição dos estoques de C e N nas frações físicas das camadas de 0-2,5 e 2,5-7,5 cm, a proporção desses estoques na fração argila foi maior que na fração silte em praticamente todos os tratamentos (Figura 5.4a, 5.4b, 5.4d, 5.4e), embora ambas frações granulométricas tenham teores semelhantes nessas camadas (22% de argila e 24% de silte – Apêndice 18 e 19). Isso evidencia o efeito da interação organo-mineral na fração argila

como uma forma de proteção da matéria orgânica. Na camada de 37,5-47,5 cm a fração argila também corresponde ao maior reservatório de C, porém deve-se levar em conta que nessa camada o teor de argila é maior (36%) em relação ao teor de silte (18%) (Apêndice 18).

Entre os sistemas de culturas, a distribuição dos estoques de C e N nas frações físicas está associada com a correspondente adição de resíduos, de forma que em sistemas com elevadas adições a proporção de C e N na MOP é maior, como é o caso dos sistemas LB+MI e GD+MI (Figura 5.4a, 5.4b, 5.4d, 5.4e). O estoque de C na MOP da camada de 0-2,5 cm chegou a representar mais de 30% do estoque total (Figura 5.4a). Esse aumento da proporção de C e N na MOP é correspondida com uma diminuição da proporção na fração argila, enquanto que a proporção na fração silte parece não ser afetada de forma considerável. De forma similar aos sistemas de culturas com maior adição, a adubação nitrogenada também tendeu a incrementar a proporção dos estoques de C e N na MOP, especialmente na camada superficial do solo (Figura 5.4a, 5.4d).

Embora a maior proporção de C e N da MOP nos sistemas com leguminosas signifique maior labilidade da MOS, visto que a proporção de matéria orgânica protegida pela argila através de interação organo-mineral diminui, isso não deve ser considerado como um fato negativo. Pelo contrário, pode expressar a capacidade do solo em proteger esse material particulado fisicamente no interior de agregados. Por isso é essencial que o solo de tais sistemas não seja revolvido, a fim de que a MOP também possa se tornar um reservatório importante de C e N no solo.

Em função dessa distribuição dos estoques de C e N nas frações físicas e considerando que a matéria orgânica contida nas frações MOP e silte constitua o principal compartimento da fração lábil da MOS, calculou-se índice de manejo de carbono (IMC), a partir da adaptação da proposta original de Blair et al. (1995). A matéria orgânica da fração silte foi considerada lábil devido ao fato de também conter material orgânico particulado (Figura 5.3). Para esse cálculo, considerou-se a camada de 0-7,5 cm, a partir da média ponderada dos teores de C no solo e das frações físicas das camadas de 0-2,5 cm e 2,5-7,5 cm. Os sistemas LB+MI e GD+MI em função de superarem os estoques de C e

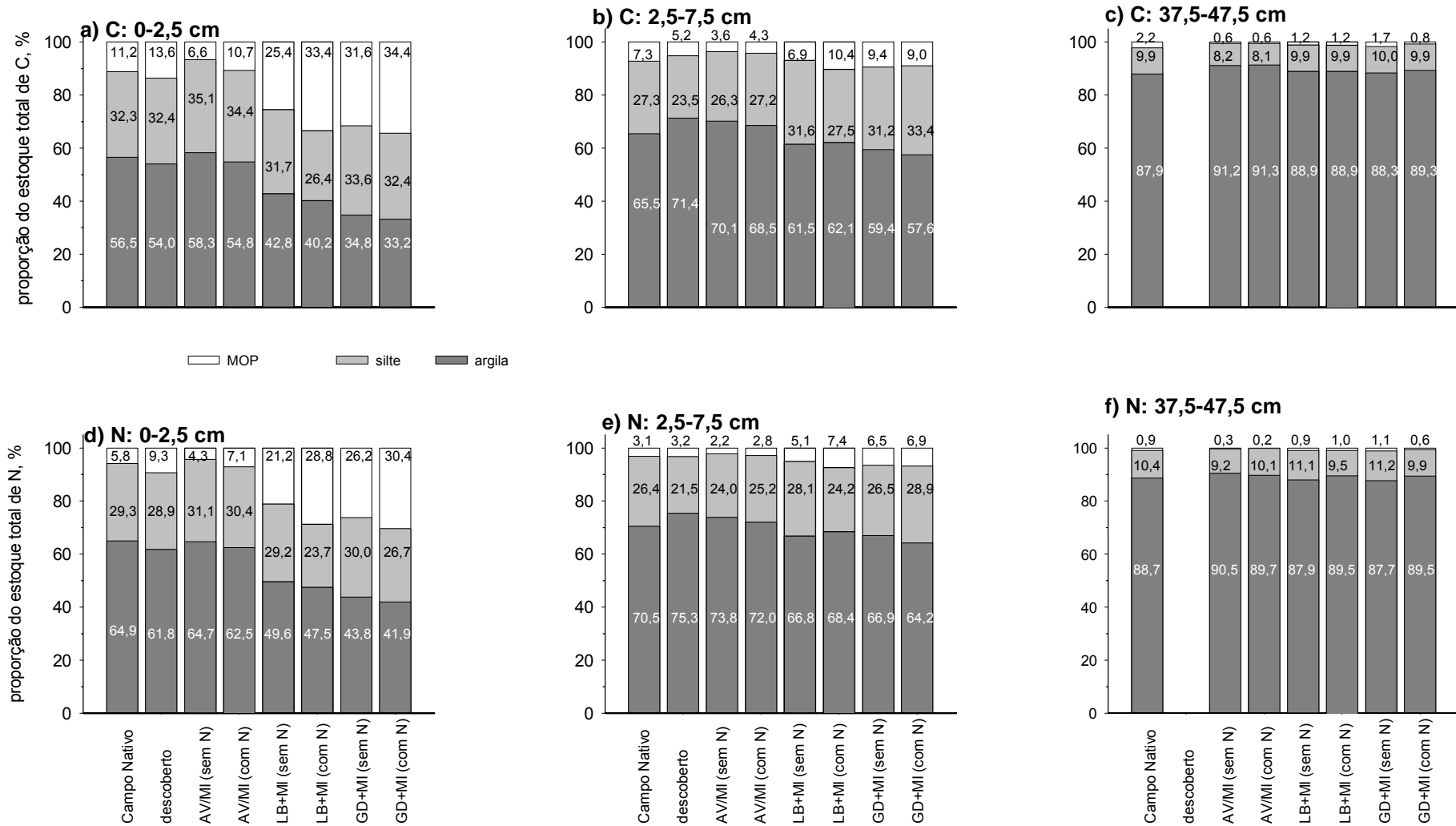


Figura 5.4. Distribuição do estoque total de C (a,b,c) e N (d,e,f) nas frações físicas MOP, silte e argila das camadas de 0-2,5 cm (a,d), 2,5-7,5 cm (b,e) e 37,5-47,5 cm (c,f) do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

N do campo nativo apresentaram índices de estoque de carbono (IECs) superiores a 1,00 (Tabela 5.3). O índice de labilidade, em função da elevada proporção de MOP, também foi superior a 1,00 nesses sistemas e em função disso também apresentaram os maiores IMCs, com valores variando entre 164 e 256 (Tabela 5.3). O fato desses sistemas possuírem IMCs superiores ao do campo nativo (100), que representa o sistema de referência, evidencia a capacidade dos mesmos em melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade do agroecossistema em regiões subtropicais. Por outro lado,

Tabela 5.3. Estoque de C total e nas frações físicas, C lábil, índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do carbono (L), índice de labilidade (IL) e índice de manejo de carbono (IMC) na camada de 0-7,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Campo nativo foi considerado como a referência para cálculo do IMC. Os estoques de C correspondem a média ponderada entre as camadas de 0-2,5 e 2,5-7,5 cm.

tratamento	C total	C MOP	C silte	C argila	C lábil <sup>1/</sup>	IEC <sup>2/</sup>	L <sup>3/</sup>	IL <sup>4/</sup>	IMC <sup>5/</sup>
	-----g dm <sup>-3</sup> solo -----								
campo nativo	27,64	2,14	7,09	14,94	9,23	1,00	0,62	1,00	100
solo descoberto	15,70	1,26	3,99	9,51	5,25	0,57	0,55	0,89	51
AV/MI (sem N)	18,03	0,79	4,93	10,78	5,72	0,65	0,53	0,86	56
AV/MI (com N)	20,23	1,33	5,77	12,00	7,10	0,73	0,59	0,96	70
LB+MI (sem N)	30,65	4,50	8,80	14,50	13,30	1,11	0,92	1,48	164
LB+MI (com N)	36,17	7,04	8,59	16,28	15,63	1,31	0,96	1,55	203
GD+MI (sem N)	30,86	5,60	8,98	13,11	14,58	1,12	1,11	1,80	201
GD+MI (com N)	36,97	7,01	10,86	15,12	17,87	1,34	1,18	1,91	256

<sup>1/</sup> C lábil = C MOP + C silte; <sup>2/</sup> IEC = C total do tratamento / C total do campo nativo;

<sup>3/</sup> L = C lábil / C não lábil. Considerou-se como C lábil o C das frações MOP e argila;

<sup>4/</sup> IL = L tratamento / L campo nativo; <sup>5/</sup> IMC = IEC x IL x 100

os IMCs no solo descoberto (51), no AV/MI (sem N) (56) e no AV/MI (com N) (70) foram menores que o do campo nativo. É importante considerar que nesse cálculo também estão computados os efeitos do manejo convencional do solo realizado entre os anos de 1969 e 1983, antes da instalação do experimento. Por isso, embora o sistema solo descoberto e AV/MI (sem N) possam realmente ser responsáveis pela diminuição da qualidade do solo, o mesmo não pode ser afirmado com relação ao sistema AV/MI (com N), pois o mesmo

manteve os estoques de C e N do solo praticamente constantes ao longo do período experimental, além de ser amplamente utilizado na região Sul do Brasil com bons resultados em termos de estabilidade ou incremento de produção.

### **5.3.2. Perdas e ganhos de C e N nas frações físicas do solo**

Para estimar as perdas e ganhos de C e N nas frações físicas do solo, promovidas pelos sistemas de culturas durante o período experimental, o sistema AV/MI (com N) foi tomado como referência, representando as condições do solo no início do experimento (1983). Como visto no Estudo I, esse sistema manteve os estoques de C e N do solo praticamente constantes ao longo do tempo. Assumiu-se que a distribuição dos estoques de C e N nas frações também foram mantidas ao longo do tempo, embora se admita que no início do experimento a proporção de MOP tenha sido menor do que a atualmente encontrada no sistema AV/MI (com N). Nesse caso, os ganhos reais ocorridos nessa fração estão sendo subestimados e as perdas reais superestimadas.

Nas duas camadas superficiais do solo descoberto e do sistema AV/MI (sem N), as perdas absolutas de C e de N na fração argila foram maiores que nas frações silte e MOP (Tabela 5.4). Isto porque a fração argila corresponde ao maior reservatório de matéria orgânica dessas camadas nesses tratamentos (Figura 5.4). Por outro lado, em função das interações organo-minerais, apresentou a menor perda relativa de C e N em relação as demais frações (Tabela 5.4). No caso do sistema AV/MI (sem N), os estoques de C na camada de 0-2,5 cm reduziram 48% na MOP, 13% na silte e 10% na argila (Tabela 5.4). Na camada de 37,5-47,5 cm a tendência de perda e ganho de C e N entretanto não foi muito clara (Tabela 5.4), o que pode ser devido aos baixos estoques desses elementos nesta camada.

O processo de ganho absoluto de C e N ao longo das frações físicas nos sistemas LB+MI e GD+MI (sem N e com N) não foi o mesmo para as duas camadas superficiais do solo. Na camada de 0-2,5 cm, o maior ganho absoluto foi na MOP, em função das elevadas adições de resíduos vegetais na superfície do solo, diminuindo nas frações silte e argila (Tabela 5.4). Enquanto isso, na camada de 2,5-7,5 cm, onde a influência dos resíduos da parte aérea

Tabela 5.4. Perdas e ganhos absolutos de C e N ( $\text{g dm}^{-3}$ ) nas frações físicas das camadas de 0-2,5, 2,5-7,5, 0-7,5 e 37,5-47,5 cm do solo dos sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada. Valores positivos representam ganhos e valores negativos perdas. Valores entre parênteses representam perdas e ganhos relativos (%).

tratamento	carbono						nitrogênio					
	MOP		silte		argila		MOP		silte		argila	
----- 0-2,5 cm -----												
solo descoberto	-0,18	(-7)	-2,50	(-30)	-3,58	(-27)	0,00	(0)	-0,17	(-27)	-0,32	(-24)
AV/MI (sem N)	-1,24	(-48)	-1,09	(-13)	-1,27	(-10)	-0,07	(-47)	-0,05	(-8)	-0,10	(-8)
AV/MI (com N) <sup>1/</sup>	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)
LB+MI (sem N)	8,02	(312)	5,01	(61)	4,73	(36)	0,63	(420)	0,44	(69)	0,50	(38)
LB+MI (com N)	13,69	(533)	4,64	(57)	6,51	(50)	1,10	(733)	0,38	(59)	0,72	(54)
GD+MI (sem N)	10,28	(400)	5,53	(68)	1,09	(8)	0,71	(473)	0,34	(53)	0,10	(8)
GD+MI (com N)	13,87	(540)	7,31	(89)	2,83	(22)	1,04	(693)	0,44	(69)	0,31	(23)
----- 2,5-7,5 cm -----												
solo descoberto	-0,02	(-3)	-1,42	(-31)	-1,94	(-17)	-0,01	(-20)	-0,15	(-35)	-0,23	(-19)
AV/MI (sem N)	-0,19	(-27)	-0,72	(-16)	-1,18	(-10)	-0,02	(-40)	-0,08	(-19)	-0,13	(-11)
AV/MI (com N) <sup>1/</sup>	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)
LB+MI (sem N)	0,75	(106)	2,05	(45)	1,39	(12)	0,06	(120)	0,16	(37)	0,17	(14)
LB+MI (com N)	1,72	(242)	1,42	(42)	3,16	(28)	0,13	(260)	0,14	(33)	0,39	(32)
GD+MI (sem N)	1,27	(179)	2,05	(45)	1,12	(10)	0,08	(160)	0,11	(25)	0,15	(12)
GD+MI (com N)	1,59	(224)	3,98	(84)	3,27	(28)	0,11	(220)	0,27	(63)	0,33	(27)
----- 0-7,5 cm -----												
solo descoberto	-0,07	(-5)	-1,78	(-31)	-2,49	(-21)	0,00	(-4)	-0,15	(-31)	-0,26	(-20)
AV/MI (sem N)	-0,54	(-40)	-0,84	(-15)	-1,21	(-10)	-0,03	(-40)	-0,07	(-14)	-0,12	(-10)
AV/MI (com N) <sup>1/</sup>	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)
LB+MI (sem N)	3,17	(238)	3,04	(53)	2,50	(21)	0,25	(304)	0,25	(50)	0,28	(22)
LB+MI (com N)	5,71	(429)	2,83	(49)	4,28	(36)	0,45	(548)	0,22	(44)	0,50	(40)
GD+MI (sem N)	4,27	(321)	3,21	(56)	1,11	(9)	0,29	(355)	0,19	(37)	0,13	(10)
GD+MI (com N)	5,68	(428)	5,09	(88)	3,12	(26)	0,42	(517)	0,33	(65)	0,32	(26)
----- 37,5-47,5 cm -----												
solo descoberto	-	-	0,09	(9)	-0,88	(-8)	-	-	0,00	0	-0,10	(-10)
AV/MI (sem N)	-0,01	(-12)	-0,04	(-4)	-0,49	(-4)	0,00	(0)	-0,01	-8	0,03	(3)
AV/MI (com N) <sup>1/</sup>	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	(0)	0,00	0	0,00	(0)
LB+MI (sem N)	0,07	(88)	0,25	(24)	-0,08	(-1)	0,01	(150)	0,00	0	-0,07	(-7)
LB+MI (com N)	0,10	(125)	0,34	(33)	0,82	(7)	0,01	(225)	0,00	0	0,09	(9)
GD+MI (sem N)	0,16	(200)	0,39	(38)	0,97	(8)	0,01	(275)	0,02	17	0,07	(7)
GD+MI (com N)	0,03	(38)	0,37	(36)	1,04	(9)	0,00	(75)	0,01	8	0,10	(10)

<sup>1/</sup> O sistema de culturas AV/MI (com N) foi considerado como referência, representando as condições de solo no início do experimento.



de plantas é menor, os maiores ganhos absolutos ocorreram nas frações silte ou argila (Tabela 5.4). Integrando-se as duas camadas superficiais numa só, de 0-7,5 cm, a MOP ainda continuou a ser a fração com os maiores ganhos absolutos de C e N (Tabela 5.4). Com relação aos acúmulos relativos, estes também foram maiores na MOP, diminuindo na fração silte e posteriormente na argila. Como exemplo, no sistema GD+MI (com N), os ganhos foram de 540% na MOP, 89% na fração silte e 22% na fração argila. Isso reforça o fato de que a MOP é a fração mais afetada por práticas de manejo, como já evidenciado por outros pesquisadores (Janzen et al., 1992; Gregorich & Janzen, 1996; Bayer et al., 2001).

### **5.3.3. Relação C:N das frações físicas**

Referente a alguns aspectos qualitativos da matéria orgânica das frações físicas reveladas pela relação C:N, percebe-se que, em todas as camadas, as maiores variações entre tratamentos ocorreram na MOP, devido a influência dos resíduos vegetais, e as menores na fração argila (Tabela 5.5). A tendência de diminuição da relação C:N da MOP na seqüência campo nativo → AV/MI → GD+MI → LB+MI foi observada nas três camadas e reflete exatamente a tendência observada para a relação C:N das plantas de cobertura de tais sistemas (Tabela 5.6). Isso é coerente com o fato das leguminosas apresentarem menor relação C:N que as gramíneas. Entre as gramíneas, as plantas do campo nativo apresentaram maior relação C:N que a aveia preta provavelmente por estarem num estágio mais avançado de desenvolvimento, enquanto que a tendência de maior relação C:N no guandu em relação ao lablab pode estar relacionada com uma concentração maior de lignina na primeira (Lassus, 1990).

Na fração argila as diferenças na relação C:N foram praticamente nulas entre os sistemas (Tabela 5.5), apesar das grandes variações observadas na parte aérea de plantas e na MOP. Isso suporta algumas conclusões de Oades et al. (1988) de que a qualidade da matéria orgânica em frações granulométricas de menor tamanho (argila) é mais relacionada com a composição dos produtos de origem microbiana e com as interações organo-minerais do que com a composição e quantidade de resíduo de plantas adicionado ao solo.

Tabela 5.5. Relação C:N das frações físicas do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

tratamento	solo		
	MOP	silte	argila
----- 0-2,5 cm -----			
campo nativo	22,5 ± 0,2	12,9 ± 0,3	10,2 ± 0,2
descoberto	15,6 ± 0,3	12,0 ± 0,0	9,3 ± 0,1
AV/MI (sem N)	16,3 ± 0,1	12,0 ± 0,2	9,6 ± 0,3
AV/MI (com N)	17,0 ± 0,1	12,7 ± 0,2	9,9 ± 0,4
LB+MI (sem N)	13,6 ± 0,1	12,2 ± 0,2	9,7 ± 0,2
LB+MI (com N)	13,0 ± 0,2	12,5 ± 0,1	9,5 ± 0,1
GD+MI (sem N)	15,0 ± 0,3	14,0 ± 0,0	9,9 ± 0,2
GD+MI (com N)	13,8 ± 0,0	14,3 ± 0,6	9,7 ± 0,2
média	<b>15,9 ± 3,0</b>	<b>12,8 ± 0,9</b>	<b>9,7 ± 0,3</b>
----- 2,5-7,5 cm -----			
campo nativo	25,2 ± 0,5	11,4 ± 0,4	10,3 ± 0,0
descoberto	16,5 ± 0,0	11,1 ± 0,2	9,6 ± 0,1
AV/MI (sem N)	15,6 ± 0,0	10,9 ± 0,6	9,5 ± 0,1
AV/MI (com N)	14,9 ± 0,1	10,7 ± 0,1	9,4 ± 0,0
LB+MI (sem N)	13,5 ± 0,1	11,3 ± 0,1	9,2 ± 0,0
LB+MI (com N)	13,9 ± 1,7	11,4 ± 0,3	9,1 ± 0,1
GD+MI (sem N)	14,9 ± 0,0	12,2 ± 0,5	9,2 ± 0,2
GD+MI (com N)	14,0 ± 0,3	12,3 ± 0,2	9,6 ± 0,4
média	<b>16,1 ± 3,8</b>	<b>11,4 ± 0,6</b>	<b>9,5 ± 0,4</b>
----- 37,5-47,5 cm -----			
campo nativo	26,1 ± 1,2	10,2 ± 1,2	10,6 ± 0,5
descoberto	n.d. <sup>2/</sup>	9,6 ± 0,8	11,0 ± 0,2
AV/MI (sem N)	18,3 ± 1,5	9,2 ± 1,1	10,4 ± 0,1
AV/MI (com N)	18,2 ± 0,1	8,8 ± 0,7	11,1 ± 0,5
LB+MI (sem N)	14,4 ± 0,3	10,4 ± 0,2	11,8 ± 0,2
LB+MI (com N)	14,3 ± 0,1	11,4 ± 0,5	10,9 ± 0,0
GD+MI (sem N)	16,3 ± 0,5	10,0 ± 0,4	11,2 ± 0,1
GD+MI (com N)	14,7 ± 0,8	11,1 ± 0,1	11,1 ± 0,7
média	<b>17,5 ± 4,2</b>	<b>10,1 ± 0,9</b>	<b>11,0 ± 0,4</b>

<sup>1/</sup> Aveia preta é a planta de cobertura no sistema AV/MI, lablab no sistema LB+MI e guandu no sistema GD+MI.

<sup>2/</sup> n.d.= não determinada devido a quantidade insuficiente de amostra.

Entre as camadas de solo, existe uma tendência de aumento da relação C:N da MOP em profundidade (Tabela 5.5), o que pode estar relacionado com o fato do aumento da proporção de matéria orgânica derivada do sistema radicular, que possui maior relação lignina/N que a parte aérea (Balesdent & Balabane, 1996). Na fração silte a relação C:N diminuiu em profundidade (Tabela 5.5), provavelmente em função de um maior grau de

decomposição do material orgânico ou da diminuição da proporção de MOP dentro desta fração. Por outro lado, na fração argila ocorreu um aumento da relação C:N em profundidade (Tabela 5.5) e como explicado no Estudo I, isso pode ser devido a lixiviação de material orgânico solúvel de elevada relação C:N e que acumulou na camada mais argilosa de 37,5-47,5 cm.

Tabela 5.6. Concentração de C e N e relação C:N da parte aérea da vegetação do campo nativo e das plantas de cobertura e de milho.

Sistema	espécie	g kg <sup>-1</sup>		relação C:N
		carbono	nitrogênio	
campo nativo	várias*	431,7 ± 2,6	9,9 ± 0,5	43,6 ± 1,7
AV/MI (sem N)	aveia	429,4 ± 1,0	15,1 ± 1,2	28,4 ± 2,2
AV/MI (com N)	aveia	428,9 ± 0,1	14,7 ± 0,2	29,2 ± 0,3
LB+MI (sem N)	lablab	438,4 ± 2,3	32,9 ± 0,1	13,3 ± 0,0
LB+MI (com N)	lablab	444,2 ± 1,0	36,0 ± 2,3	12,3 ± 0,8
GD+MI (sem N)	guandu	465,8 ± 2,3	32,7 ± 1,9	14,2 ± 0,8
GD+MI (com N)	guandu	465,0 ± 1,6	33,8 ± 0,1	13,8 ± 0,0
	média	<b>443,3 ± 16,0</b>	<b>25,0 ± 11,2</b>	<b>22,2 ± 12,0</b>
AV/MI (sem N)	milho	423,6 ± 0,9	6,0 ± 0,2	70,6 ± 2,5
AV/MI (com N)	milho	442,2 ± 2,3	5,6 ± 0,7	79,0 ± 9,2
LB+MI (sem N)	milho	432,8 ± 0,5	6,8 ± 0,6	63,6 ± 6,0
LB+MI (com N)	milho	436,3 ± 0,6	6,6 ± 0,2	66,1 ± 1,6
GD+MI (sem N)	milho	438,7 ± 1,8	4,8 ± 0,7	91,4 ± 12,9
GD+MI (com N)	milho	435,1 ± 0,4	8,3 ± 0,5	52,4 ± 3,0
	média	<b>434,8 ± 6,4</b>	<b>6,3 ± 1,2</b>	<b>71,2 ± 13,9</b>

\* Principais gêneros são *Paspalum* e *Andropogon* (Moojen, 1991).

Ao longo das frações físicas, a relação C:N diminuiu de MOP para argila (Tabela 5.5), o que indica um avanço no grau de humificação em frações granulométricas de menor tamanho, como já observado em estudos anteriores (Turchenek & Oades, 1979; Tiessen & Stewart, 1983; Christensen, 1992). Essa variação na relação C:N também pode ser usada como um indicativo da fonte de matéria orgânica para a fração. A maior relação C:N na MOP indica que os resíduos de plantas são a principal fonte. Na fração argila, os menores valores de relação C:N indicam que a principal fonte são produtos de origem microbiana, considerando que a biomassa de fungos possui uma relação C:N que varia entre 15:1 e 4,5:1 e de bactérias entre 5:1 e 3:1 (Paul & Clark, 1996). Isso está em acordo com a idéia de que microrganismos desempenham

importante papel em determinar a composição orgânica da fração argila (Oades et al., 1988).

#### 5.3.4. Capacidade de estoque de matéria orgânica em frações físicas

Com o objetivo de verificar a possibilidade das frações físicas do solo possuírem uma capacidade finita de estocar matéria orgânica, relacionou-se os estoques de C e N de tais frações com os respectivos estoques totais no solo (Figura 5.5). Na camada de 0-2,5 cm, os estoques de C e N nas frações físicas seguiram modelos distintos de acúmulo em relação ao incremento nos respectivos estoques totais (Figura 5.5a, 5.5c). O acúmulo de C e N da fração argila seguiu um modelo de crescimento exponencial “tendendo a máximo”, enquanto que da fração silte seguiu um modelo linear e da MOP um modelo de crescimento exponencial. Na fração argila o modelo está de acordo com o fenômeno de interação organo-mineral, similar a isothermas de adsorção. Isso indica que à medida que os sítios de interação da superfície dos minerais vão sendo ocupados, a capacidade da fração argila em estocar matéria orgânica vai tendendo à um nível de saturação. Nesse caso, segundo o modelo proposto, a capacidade da fração argila deste solo em armazenar C e N foi estimada em  $17,2 \text{ g C dm}^{-3}$  de solo e de  $2,10 \text{ g N dm}^{-3}$  de solo, respectivamente, o que corresponde a  $47,7 \text{ g C kg}^{-1}$  de argila e  $6,4 \text{ g N kg}^{-1}$  de argila (considerando uma densidade média de solo de  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  e um teor de argila de 22%). Esse valor de saturação para C é maior que aquele encontrado por Roscoe et al. (2001), cujo valor foi de  $32,5 \text{ g C kg}^{-1}$  de argila, num Latossolo de Cerrado onde a mineralogia da fração argila também era predominantemente caulinita. Essa diferença com relação ao dado obtido por Roscoe et al. (2001) pode ser explicada em função de diferenças nas metodologias de cálculo, bem como variações nas condições de solo e clima.

Considerando o valor de  $17,2 \text{ g C dm}^{-3}$  como a capacidade máxima da fração argila em estocar C, pode-se afirmar que na camada de 0-2,5 cm do solo de campo nativo essa capacidade já foi atingida e no sistema AV/MI (sem e com N) inclusive superada (Figura 5.2a). O fato de que o sistema LB+MI tenha superado esse valor estimado é um indicativo de que o mesmo pode apresentar variações.

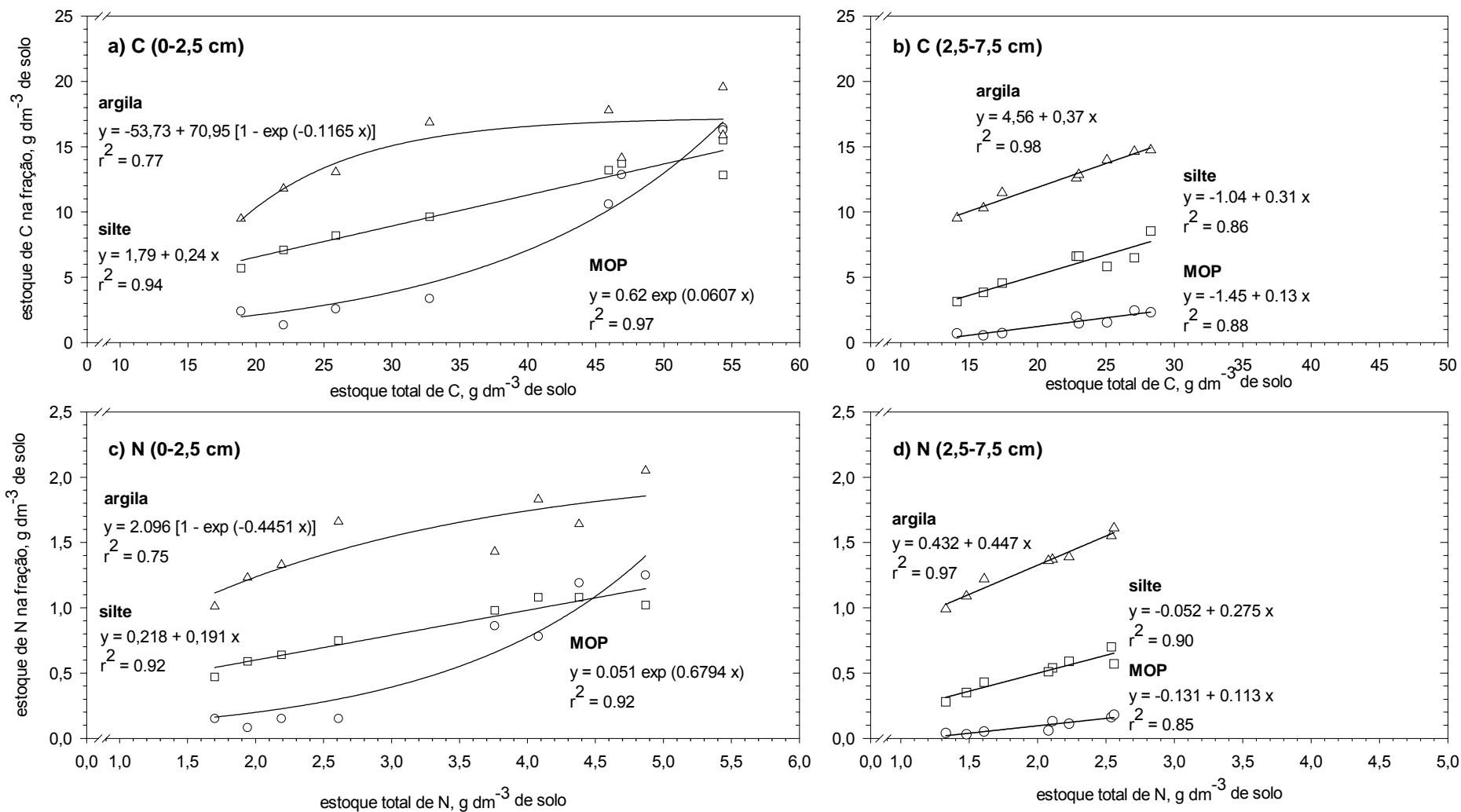


Figura 5.5. Relação entre os estoques de C (a,b) e de N (c,d) das frações físicas e os respectivos estoques totais nas camadas de 0-2,5 (a,c) e 2,5-7,5 cm (b,d) do solo.

O modelo linear de acúmulo de C e N na fração silte pode ser considerado como intermediário entre os modelos da fração argila e de MOP (Figura 5.5a, 5.5c), sem apresentar uma tendência de saturação para a capacidade de estoque desses elementos. É provável que em função do método de fracionamento empregado a fração silte corresponda a uma mistura de matéria orgânica associada com minerais, como na argila, e MOP. Nesse caso, a MOP foi provavelmente a responsável por essa tendência linear ilimitada de incremento nos estoques de C e N na fração silte.

Com relação a MOP, o modelo exponencial crescente pode ser considerado como válido somente para os dados experimentais obtidos. Além desses valores, o acúmulo de C e N segue provavelmente um modelo linear, assim como para a fração silte. Isso significa que quando a fração argila tende a atingir a saturação de sua capacidade de estocar C e N, os incrementos posteriores no estoque total de C e N irão ocorrer somente nas frações MOP (Hassink & Whitemore, 1997) e silte. Isso indica que embora a fração argila possua uma capacidade finita de estocar matéria orgânica, o mesmo não é válido para o solo como um todo, devido a capacidade ilimitada das frações silte e MOP acumularem matéria orgânica. Obviamente que para isso as adições também devem ser contempladas.

Na camada de 2,5-7,5 cm todas as frações físicas apresentaram um modelo linear de acúmulo de C e N (Figura 5.5b, 5.5d). Para as frações argila e MOP é provável que os estoques de C e N ainda estejam na fase linear dos respectivos modelos obtidos na camada superficial e que com aumentos nos estoques totais de matéria orgânica esse modelos irão se confirmar novamente.

#### 5.4. Conclusões

As alterações que os sistemas de culturas e a adubação nitrogenada promovem nos estoques totais de MOS em plantio direto são refletidas nas respectivas frações físicas. As alterações são maiores em termos relativos na matéria orgânica particulada (MOP) e maiores em termos absolutos nas frações silte e argila. Porém quando a adição de resíduos é elevada, na camada superficial do solo os maiores acúmulos absolutos tendem a ser na MOP ao invés de nas frações silte e argila.

A fração silte também é constituída de material orgânico particulado, e não somente de matéria orgânica associada com minerais.

Quanto maior a adição de resíduos vegetais ao solo, maior é a proporção do estoque total de C e N na fração matéria orgânica particulada.

Existe a possibilidade de se utilizar os dados obtidos por fracionamento físico no cálculo do índice de manejo de carbono (IMC) e nesse caso, o maior IMC em sistemas de culturas com leguminosas estivais indica que as mesmas promovem maior qualidade do solo em relação aos sistemas constituídos unicamente por gramíneas.

A fração argila possui uma capacidade finita de estocar matéria orgânica, o que não é observado nas frações MOP e silte.

## **6. ESTUDO III**

### **Qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada em plantio direto**

#### **6.1. Introdução**

Embora exista um volume relativamente significativo de dados tratando sobre alterações quantitativas que diferentes sistemas de manejo promovem sobre a matéria orgânica de solos tropicais e subtropicais, pouco se conhece a respeito da influência de tais sistemas sobre a qualidade da matéria orgânica e, por conseguinte, da sua recalcitrância molecular. Além disso, algumas informações existentes até o presente não são conclusivas, pois fatores como a metodologia de fracionamento da amostra (se químico ou físico), bem como a técnica analítica em si, podem gerar resultados distintos.

Entre as técnicas analíticas, destaca-se a espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN), que possui a vantagem de fornecer informações sobre todos os tipos de compostos presentes na matéria orgânica do solo num único espectro. Entretanto, para melhorar a qualidade dos resultados, especialmente quando se tem por objetivo quantificar os diferentes tipos de C ou N presentes na amostra, a técnica ainda requer alguns ajustes, principalmente no que diz respeito ao preparo da amostra e a definição de melhores parâmetros de análise (tempo de contato, tempo de aquisição, etc.).

É importante utilizar a espectroscopia RMN associada com outras técnicas de análise, de forma que resultados mais confiáveis possam ser obtidos. Entre essas outras técnicas, pode-se mencionar a hidrólise ácida e a pirólise analítica, que fornecem dados complementares e também podem expressar certos detalhes da composição nem sempre detectados pelas técnicas espectroscópicas de RMN-<sup>13</sup>C ou -<sup>15</sup>N.



Os trabalhos de investigação da qualidade da matéria orgânica em sistemas de culturas com emprego da espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C no estado sólido (CPMAS) em condições subtropicais brasileiras são baseados principalmente na fração ácido húmico do solo (Ceretta, 1995; Pillon, 2000). Assim, torna-se oportuno a realização de um trabalho adicional envolvendo o emprego dessa técnica em frações físicas do solo, de maneira que os resultados possam ser comparados com aqueles obtidos para ácidos húmicos. Além disso, possíveis problemas oriundos da extração química de material orgânico, como seletividade de extração e formação de artefatos, podem ser evitados.

Entre as frações físicas, a matéria orgânica particulada (MOP) é constituída basicamente de resíduos de origem vegetal (Gregorich & Janzen, 1996). Enquanto isso, a matéria orgânica da fração argila é derivada principalmente de produtos de origem microbiana, como mucilagens, metabólitos e resíduos celulares (Oades, 1984; Guggenberger et al., 1994), não sendo afetada pela natureza e quantidade dos resíduos vegetais adicionados (Oades et al., 1988).

O estudo baseia-se nas seguintes hipóteses:

- Sistemas de culturas sob plantio direto influem na qualidade da matéria orgânica particulada (MOP), porém não sobre a qualidade da matéria orgânica associada aos minerais (fração argila).
- A adubação nitrogenada não afeta a qualidade da matéria orgânica do solo e de suas frações físicas.

O objetivo do presente estudo foi:

- avaliar a influência de sistemas de culturas com espécies gramíneas e leguminosas e da adubação nitrogenada do milho em plantio direto na qualidade química da matéria orgânica do solo e de suas frações físicas.

## 6.2. Material e métodos

### 6.2.1. Experimento de campo e coleta de amostras

Informações referentes ao experimento e coleta das amostras de solo e de tecido encontram-se descritas no Capítulo 3 (Material e Métodos Geral).

### 6.2.2. Tratamentos avaliados e técnicas analíticas empregadas

Para a realização do presente estudo se utilizou os sistemas solo descoberto, AV/MI (sem N e com N) e GD+MI (sem N e com N), além do campo nativo. Empregou-se amostras do solo integral (mistura das três repetições) e das frações MOP, silte e argila das camadas de 0-2,5, 2,5-7,5 e 37,5-47,5 cm, obtidas a partir do trabalho de fracionamento físico do Estudo II (item 5.2.3). A qualidade da matéria orgânica foi avaliada por espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C CPMAS, espectroscopia de RMN-<sup>15</sup>N CPMAS, hidrólise ácida e pirólise analítica (Py-GC/MS). Exceto para RMN-<sup>13</sup>C, as demais técnicas não foram aplicadas sobre todas as amostras, mas somente em algumas, como demonstrado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Amostras de solo e de frações físicas avaliadas pelas diferentes técnicas analíticas. <sup>13</sup>C = RMN-<sup>13</sup>C CPMAS; <sup>15</sup>N = RMN-<sup>15</sup>N CPMAS; Hid = hidrólise ácida; Pir = pirólise analítica.

camada cm	sistema	solo integral				fração MOP				fração silte				fração argila			
		<sup>13</sup> C	<sup>15</sup> N	Hid	Pir	<sup>13</sup> C	<sup>15</sup> N	Hid	Pir	<sup>13</sup> C	<sup>15</sup> N	Hid	Pir	<sup>13</sup> C	<sup>15</sup> N	Hid	Pir
0-2,5	campo nativo	x*	x*	x	x	x			x	x			x	x	x		
	descoberto	x*	x*	x	x	x			x	x			x	x	x		
	AV/MI (sem N)	x*	x*	x	x	x			x	x			x	x	x		
	AV/MI (com N)	x*	x*	x	x	x			x	x			x	x	x		
	GD+MI (sem N)	x*	x*	x	x	x			x	x			x	x	x		
	GD+MI (com N)	x*	x*	x	x	x			x	x			x	x	x		
2,5-7,5	campo nativo	x*		x		x			x				x				
	descoberto	x*		x		x			x				x				
	AV/MI (sem N)	x*		x		x			x				x				
	AV/MI (com N)	x*		x		x			x				x				
	GD+MI (sem N)	x*		x		x			x				x				
	GD+MI (com N)	x*		x		x			x				x				
37,5-47,5	campo nativo	x*				x			x*				x*				
	descoberto	x*				n.d.			x*				x*				
	AV/MI (sem N)	x*				n.d.			x*				x*				
	AV/MI (com N)	x*				n.d.			x*				x*				
	GD+MI (sem N)	x*				x			x*				x*				
	GD+MI (com N)	x*				n.d.			x*				x*				

\* Amostras tratadas com ácido fluorídrico (HF) 10%.

n.d.: não determinado devido a insuficiente quantidade de amostra.

Além das amostras de solo e das frações físicas, amostras do tecido da parte aérea de plantas de aveia, guandu e milho, constituintes dos sistemas de culturas, e de plantas do campo nativo também foram analisadas por espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C CPMAS.

Na seqüência segue uma breve descrição metodológica das técnicas analíticas empregadas.

#### **a) Espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C CPMAS**

Antes da análise espectroscópica propriamente dita, as amostras de solo integral das três camadas e das frações silte e argila da camada de 37,5-47,5 cm foram tratadas com solução de ácido fluorídrico 10% (HF), com o objetivo de concentrar o C na amostra e melhorar a qualidade dos espectros de RMN (Schmidt et al., 1997). Considerando que praticamente não houveram alterações na relação C:N das amostras em função do tratamento com HF (Tabela 6.2), exceto para a fração silte da camada de 37,5-47,5 cm, supõem-se que a composição da matéria orgânica não foi alterada pelo tratamento, o que também foi constatado em trabalhos anteriores (Schmidt et al., 1997; Gonçalves et al., 2003). A quantidade recuperada de C e N após o tratamento com HF (Tabela 6.2) variou em média de 76-77% na camada de 0-2,5 cm para 37-40% na camada de 37,5-47,5 cm, numa relação direta com a concentração inicial desses elementos nas amostras de solo (Tabela 4.1, Estudo I) e frações (Apêndice 19). A diminuição da percentagem de recuperação de C e N em profundidade também foi observada por Gonçalves et al. (2003) para alguns Latossolos brasileiros. Para a fração silte da camada de 37,5-47,5 cm, observa-se que a recuperação de C (64%) foi maior que a de N (37%), o que indica que provavelmente esse C está presente em estruturas bastante recalcitrantes.

As amostras das frações silte e argila das duas camadas superficiais, por conterem elevadas concentrações de C (9,2 a 47,9 g C kg<sup>-1</sup> na fração silte e 26,1 a 50,9 g C kg<sup>-1</sup> na fração argila) (Apêndice 19), possibilitaram a obtenção de espectros de boa qualidade, com uma elevada relação sinal/ruído, e portanto não foram submetidas ao tratamento com HF.

Tabela 6.2. Relação C:N e recuperação de massa, C e N das amostras tratadas com ácido fluorídrico (HF) 10%.

tratamento	relação C:N		recuperação, % <sup>2/</sup>		
	inicial <sup>1/</sup>	final <sup>2/</sup>	C	N	massa da amostra
campo nativo	12,6	12,7	79	78	4,5
solo descoberto	11,1	11,5	76	73	3,1
AV/MI (sem N)	11,3	11,4	73	72	3,8
AV/MI (com N)	11,8	11,8	72	72	4,0
GD+MI (sem N)	12,5	12,5	79	79	6,6
GD+MI (com N)	12,4	12,6	84	82	7,0
média	12,0	12,1	77	76	4,8
campo nativo	12,1	12,0	68	68	3,1
solo descoberto	10,6	11,6	59	54	1,8
AV/MI (sem N)	10,8	10,8	65	65	2,7
AV/MI (com N)	10,9	11,2	67	65	2,4
GD+MI (sem N)	10,8	11,5	72	67	3,0
GD+MI (com N)	11,1	11,9	73	69	3,4
média	11,0	11,5	67	65	2,7
campo nativo	13,7	13,9	40	39	1,5
solo descoberto	12,8	13,9	36	33	1,3
AV/MI (sem N)	12,7	12,9	41	40	1,5
AV/MI (com N)	13,3	13,6	37	36	1,4
GD+MI (sem N)	12,9	13,9	43	40	1,6
GD+MI (com N)	12,6	13,8	40	36	1,4
média	13,0	13,7	40	37	1,4
campo nativo	10,2	16,7	61	37	2,1
solo descoberto	9,6	16,7	58	33	2,0
AV/MI (sem N)	9,2	16,3	63	35	2,0
AV/MI (com N)	8,8	16,8	64	34	2,0
GD+MI (sem N)	10,0	16,5	68	41	2,2
GD+MI (com N)	11,1	18,1	71	44	2,3
média	9,8	16,8	64	37	2,1
campo nativo	10,6	10,3	42	43	3,2
solo descoberto	11,0	11,2	33	33	2,4
AV/MI (sem N)	10,4	9,7	39	42	3,1
AV/MI (com N)	11,1	10,1	39	43	3,2
GD+MI (sem N)	11,2	10,6	41	44	3,3
GD+MI (com N)	11,1	12,6	41	36	2,7
média	10,9	10,8	39	40	3,0

<sup>1/</sup> antes do tratamento com HF; <sup>2/</sup> após o tratamento com HF.

Os espectros de RMN-<sup>13</sup>C CPMAS foram adquiridos através de um espectrômetro Bruker DSX 200, operando a 50,3 MHz, com uma frequência de giro do rotor da amostra de 6,8 kHz e um tempo de contato para polarização cruzada de 1 ms. Os demais parâmetros empregados nessa análise espectroscópica estão apresentados na Tabela 6.3. Afim de melhorar a relação

sinal/ruído, aplicou-se nos espectros um alargamento de linha entre 50 e 100 Hz. Os espectros foram divididos em quatro regiões espectrais e oito sub-regiões, de acordo com a Tabela 2.1. A quantificação dos tipos de C foi realizada através da integração das áreas dos correspondentes picos no espectro. Para simplificar a discussão dos resultados, serão apresentados os dados quantitativos somente das quatro principais regiões espectrais: C alquil (-10 a 45 ppm), C O-alquil (45 a 110 ppm), C aromático (110 a 160 ppm) e C carbonila (160 a 220 ppm). Os dados quantitativos para cada sub-região espectral estão apresentados nos Apêndices 20, 21, 22 e 23. O composto tetrametilsilano (TMS) foi usado como referência (0 ppm) na escala de deslocamento químico dos espectros. Em função do custo elevado e do tempo necessário para obtenção de um espectro de boa qualidade, as análises foram realizadas uma única vez, sem repetições ou duplicatas.

Tabela 6.3. Parâmetros específicos empregados na espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C CPMAS de diferentes tipos de amostra.

amostra		tratamento com HF	tempo de aquisição (ms)	tempo de reciclagem (s)	nº de transientes (x10 <sup>3</sup> )		
tecido de planta		não	20,5	4,000	1 – 2		
MOP				0,500	5 – 13		
fração silte	0-2,5 cm	não	6,9	0,200	190 – 250		
	2,5-7,5 cm						
	37.5-47.5 cm	sim			20 – 50		
fração argila	0-2,5 cm	não			6,9	0,200	190 – 250
	2,5-7,5 cm						
	37.5-47.5 cm	sim					20 – 50
solo integral (todas as camadas)		sim					

Tanto a análise espectroscópica de RMN-<sup>13</sup>C CPMAS como a RMN-<sup>15</sup>N CPMAS, descrita na seqüência, foram realizadas no Departamento de Solos da Universidade Técnica de Munique, Alemanha.

#### b) Espectroscopia de RMN-<sup>15</sup>N CPMAS

A espectroscopia RMN-<sup>15</sup>N CPMAS foi realizada somente com as amostras de solo integral da camada de 0-2,5 cm (Tabela 6.1), tratadas com solução de HF 10%. Os espectros foram adquiridos através de um

espectrômetro Bruker DSX 400, operando numa freqüência de radiação de 40,5 MHz, sendo a rotação em ângulo mágico na freqüência de 5,7 kHz e com um tempo de contato para polarização cruzada de 0,7 ms. Foram coletados entre  $384 \times 10^3$  e  $416 \times 10^3$  transientes, com um tempo de aquisição de 6,5 ms e tempo de reciclagem entre um pulso e outro de 0,200 s. Aplicou-se nos espectros um alargamento de linha de 150 Hz. Em função da baixa relação sinal/ruído, não se processou a quantificação dos diferentes tipos de N, sendo os espectros somente interpretados visualmente. O composto nitrometano foi usado como referência (0 ppm) na escala de deslocamento químico dos espectros. Assim como para RMN- $^{13}\text{C}$ , adquiriu-se somente um espectro por amostra.

### **c) Hidrólise ácida**

Com o objetivo de avaliar a concentração de N-aminoácido e N-não hidrolisado nas amostras de solo integral das camadas de 0-2,5 cm e 2,5-7,5 cm e da fração argila da camada de 0-2,5 cm (Tabela 6.1), utilizou-se a técnica de hidrólise ácida, adaptada pelo Departamento de Solos da Universidade Técnica de Munique a partir da proposta original de Stevenson (1996, p.1193).

Para as análises de solo integral foram utilizadas as amostras das três repetições de campo, enquanto que para as análises da fração argila, utilizou-se duplicatas da amostra obtida no fracionamento físico do Estudo II. A amostra (aproximadamente 1000 mg para solo integral e 700 mg para fração argila) foi hidrolisada por 12 h em 5 mL de mistura ácida ( $6 \text{ mol L}^{-1}$  de HCl e  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de HCOOH) dentro de frascos de vidro bem fechados, em temperatura de 110 °C (estufa). A porção não hidrolisada foi separada por filtração e analisada quanto a concentração de N, num analisador Vario EL. A porção hidrolisada (filtrado) foi transferida para um bequer (3 cm de altura x 6 cm de diâmetro), posto sobre uma chapa aquecida (150 °C) para permitir a evaporação do HCl. Quando a consistência do hidrolisado estava em “pasta”, diminuiu-se a temperatura para 80 °C, até secagem completa. No dia seguinte, o hidrolisado foi solubilizado com 5 mL de água destilada, acrescentando-se na seqüência 2 a 3 gotas de indicador fenolftaleína. Procedeu-se a titulação com NaOH (até cor de rosa), para garantir a alcalinidade do material (eliminação dos aminoacúcares), o qual foi posto na estufa a 110 °C por 45 min. A

secagem completa desse foi realizada em chapa aquecida (150 °C). Após a secagem, o hidrolisado foi novamente solubilizado com água destilada e transferido para balões volumétricos de 50 mL, completando-se o volume. Do balão volumétrico, transferiu-se uma alíquota para frascos de “eppendorf”, a qual foi centrifugada por 5 min (2000 xg). Do sobrenadante, foram transferidos 25 µl para um outro frasco de “eppendorf”, onde se adicionou 25 µl de citrato de Na (tampão) e 100 µl de ninidrina (reagente). Após a agitação dos frascos em agitador “vortex”, esses foram postos em água fervente por 20 min., para se proceder a reação dos aminoácidos com a ninidrina. Depois do resfriamento, adicionou-se 1,25 mL de uma mistura etanol:água (1:1) e se procedeu a leitura da intensidade da cor azul num colorímetro operando a 570 nm. Dados originais da hidrólise ácida são apresentados no Apêndice 24. Esse trabalho analítico também foi realizado no Departamento de Solos da Universidade Técnica de Munique.

#### **d) Pirólise analítica**

Utilizou-se a técnica de pirólise acoplada com cromatografia gasosa e espectrometria de massas (*Py-GC/MS*) para a análise das amostras de solo integral, fração MOP e argila da camada de 0-2,5 cm (Tabela 6.1). A análise foi realizada uma única vez, sem emprego de repetições ou duplicatas. Uma pequena quantidade de amostra (aproximadamente 50 mg) foi misturada com etanol, homogeneizada, e gotejada sobre o fio ferromagnético de pirólise, com uma pipeta de Pasteur. Tomou-se o cuidado de não tocar os dedos no fio, para evitar contaminação. Após a evaporação do etanol, o fio com a amostra aderida era posto no pirolisador de ponto de Curie (Horizon Instruments), conectado a um cromatógrafo de gases / espectrômetro de massas (Varian Saturn 2000 GC-MS). A temperatura de pirólise foi 600 °C, num tempo de 3,5 s. Os fragmentos orgânicos originados a partir da pirólise foram carreados para uma coluna cromatográfica capilar de 30 m (“fused-silica” da J&W, com diâmetro interno de 0,248 mm e espessura do filme de 0,25 µm), usando He como gás carreador. A temperatura do forno do cromatógrafo foi elevada de 40 °C para 300 °C, num período de 44 min, numa taxa de 6 °C min<sup>-1</sup>, sendo mantida em 300 °C por mais 10 minutos. Os fragmentos foram ionizados no espectrômetro de massas com uma energia de 70 eV, sendo os sinais

detectados na faixa entre 45-500  $m/z$ . Para a interpretação dos sinais dos pirogramas e seus respectivos espectros de massa, utilizou-se os programas computacionais Saturn GC/MS Workstation e a NIST Mass Spectral Database. Todo o trabalho de pirólise analítica foi desenvolvido no Instituto de Recursos Naturales y Agrobiologia de Sevilla, do Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Espanha.

### 6.3. Resultados e discussão

#### 6.3.1. Composição da parte aérea de plantas

Conforme os dados de RMN- $^{13}\text{C}$  (Tabela 6.4), o tipo de C predominante na parte aérea das plantas foi o C O-alquil, com uma proporção média entre as espécies de 73%, o que é coerente com o fato dos carboidratos (celulose e hemicelulose) serem os principais constituintes do tecido vegetal. Entre os demais tipos de C, a proporção média foi de 11% para C alquil, 10% para C aromático e 6% para C carbonila (Tabela 6.4).

Tabela 6.4. Proporção de diferentes tipos de C presentes na parte aérea da vegetação do campo nativo e de plantas de cobertura e de milho em sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN- $^{13}\text{C}$  CPMAS.

planta	sistema	%			
		C carbonila	C aromático	C O-alquil	C alquil
c. nativo <sup>1/</sup>	campo nativo	6	11	73	10
aveia	AV/MI (sem N)	6	7	76	11
aveia	AV/MI (com N)	6	7	76	11
guandu	GD+MI (sem N)	8	10	64	18
guandu	GD+MI (com N)	8	13	62	17
milho	AV/MI (sem N)	4	8	81	7
milho	AV/MI (com N)	4	10	80	6
milho	GD+MI (sem N)	4	10	79	7
milho	GD+MI (com N)	4	10	79	7
	média <sup>2/</sup>	6	10	73	11

<sup>1/</sup> Constituído principalmente de plantas do gênero *Paspalum* e *Andropogon*.

<sup>2/</sup> A composição média de cada tipo de C foi calculada da seguinte forma:

média = (campo nativo + média aveia sem N e com N + média guandu sem N e com N + média do milho em todos os sistemas) / 4

A composição da parte aérea de plantas variou consideravelmente entre as espécies que constituem os sistemas de culturas (Tabela 6.4), porém



não foi afetada pela adubação nitrogenada, como observado nos sistemas AV/MI e GD+MI. As plantas de guandu apresentaram a maior proporção de C alquil (17 a 18%) em relação as plantas do campo nativo (10%), de aveia (11%) e de milho (~7%) (Tabela 6.4 e Figura 6.1, nos picos de 21 e 32 ppm). Provavelmente plantas de guandu possuem maior conteúdo de polímeros de ácidos graxos de suberina, presentes no caule. A suberina é o principal constituinte do súber (casca), derivado do crescimento secundário do caule de espécies dicotiledôneas (Esau, 1981) e, no caso do guandu, seu acúmulo tende a aumentar quando as plantas são cultivadas por mais de um ciclo (observação visual). A maior concentração de material proteico nas plantas de guandu, conforme os dados de concentração de N no tecido (Tabela 5.6 do Estudo II), também pode ser a outra causa da maior proporção de C alquil nessa espécie, considerando que muitos aminoácidos possuem radicais com estruturas alifáticas.

Com relação ao C aromático, as plantas do campo nativo, de guandu e de milho tiveram proporções similares, com um valor médio de 11%, superior aos 7% observado para plantas de aveia (Tabela 6.4 e Figura 6.1, nos picos de 130 e 150 ppm). A maior proporção de C aromático nas plantas de campo nativo, guandu e milho é provavelmente devido a maior concentração de lignina nessas em relação a aveia. Isso é suportado pelo trabalho de Lassus (1990), que no mesmo experimento verificou maior teor de lignina na matéria orgânica leve do sistema GD+MI (22,5%) em relação ao sistema AV/MI (7,9%). A menor proporção de C aromático no tecido de aveia em relação as demais espécies gramíneas (campo nativo e milho) foi provavelmente devido a amostragem das plantas de aveia ter sido realizada no estágio de pré-florescimento, quando o acúmulo de lignina ainda era baixo (Esau, 1981). Enquanto isso, as plantas do campo nativo foram amostradas no outono, no final da estação de crescimento, e as de milho na colheita, quando o acúmulo de lignina já estava supostamente completo.

A proporção de C carbonila entre as espécies seguiu uma tendência similar ao do comportamento do C alquil, com o guandu apresentando a maior proporção (8%), seguido por campo nativo e aveia (6%) e por fim milho (4%) (Tabela 6.4 e Figura 6.1, no pico 172 ppm). Provavelmente o C carbonila das plantas está associado com o C alquil através das estruturas de suberina.

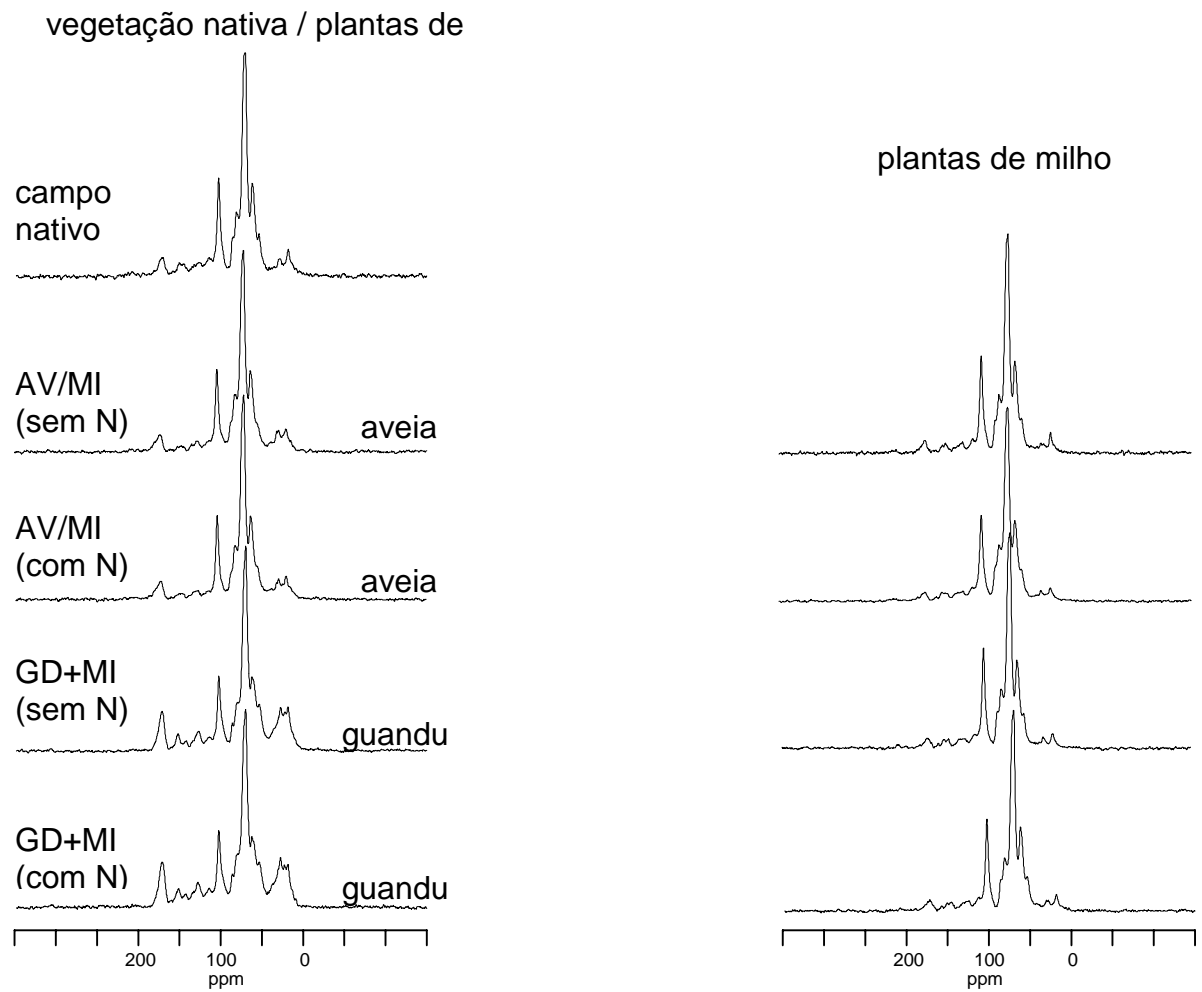


Figura 6.1. Espectros de RMN-<sup>13</sup>C CP-MAS da parte aérea da vegetação do campo nativo e de plantas de cobertura e de milho em sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

Por fim, a proporção de C O-alquil (Tabela 6.4), representado principalmente por carboidratos, foi maior nas plantas de milho (79 a 81%), diminuindo nas plantas de aveia (76%), campo nativo (73%) e guandu (62 a 64%), seguindo uma tendência aproximadamente inversa a da proporção dos demais tipos de C. Isso é lógico considerando que quanto maior a concentração de material proteico, de lignina ou de lipídios, menor tende a ser a proporção dos carboidratos no tecido.

### **6.3.2. Qualidade da matéria orgânica do solo**

#### **6.3.2.1. Solo integral**

Na média dos tratamentos avaliados, 48% do C da MOS na camada de 0-2,5 cm é do tipo C O-alquil, 25% é C alquil, 14% é C aromático e 13% é C carbonila (Figura 6.2a), demonstrando que os carboidratos são os principais constituintes orgânicos do solo, apesar de sua baixa recalcitrância molecular. Isso, associado com o fato de que os compostos aromáticos correspondem a proporções bem menores, é um primeiro indicativo de que a proteção coloidal e a proteção física da matéria orgânica, estejam sobrepondo a magnitude da proteção por recalcitrância.

Com relação aos compostos nitrogenados, os resultados obtidos com hidrólise ácida (Tabela 6.5) indicam que em média 37,7% do N total da camada superficial do solo ocorre como N-aminoácido, derivado de estruturas peptídicas/protéicas, 25,6% é N-não hidrolisado e 36,7% está na forma de N-amônia + N-aminoaçúcar + N-hidrolisado desconhecido. Esses valores de concentração das diferentes formas de N são muito similares aos obtidos por Ceretta (1995), num trabalho realizado na mesma área experimental e com a mesma profundidade de 0-2,5 cm. Além disso os valores estão dentro das faixas comumente encontradas para solo: 20-45% de N-aminoácido e 20-35% de N-não hidrolisado (Stevenson, 1994). Para 10 classes de solo do RS, Camargo et al. (1997) obtiveram valores menores para N-aminoácido (18,1%) e maiores para N-não hidrolisado (46,9%), provavelmente devido a maior profundidade de amostragem do solo (0-20cm).

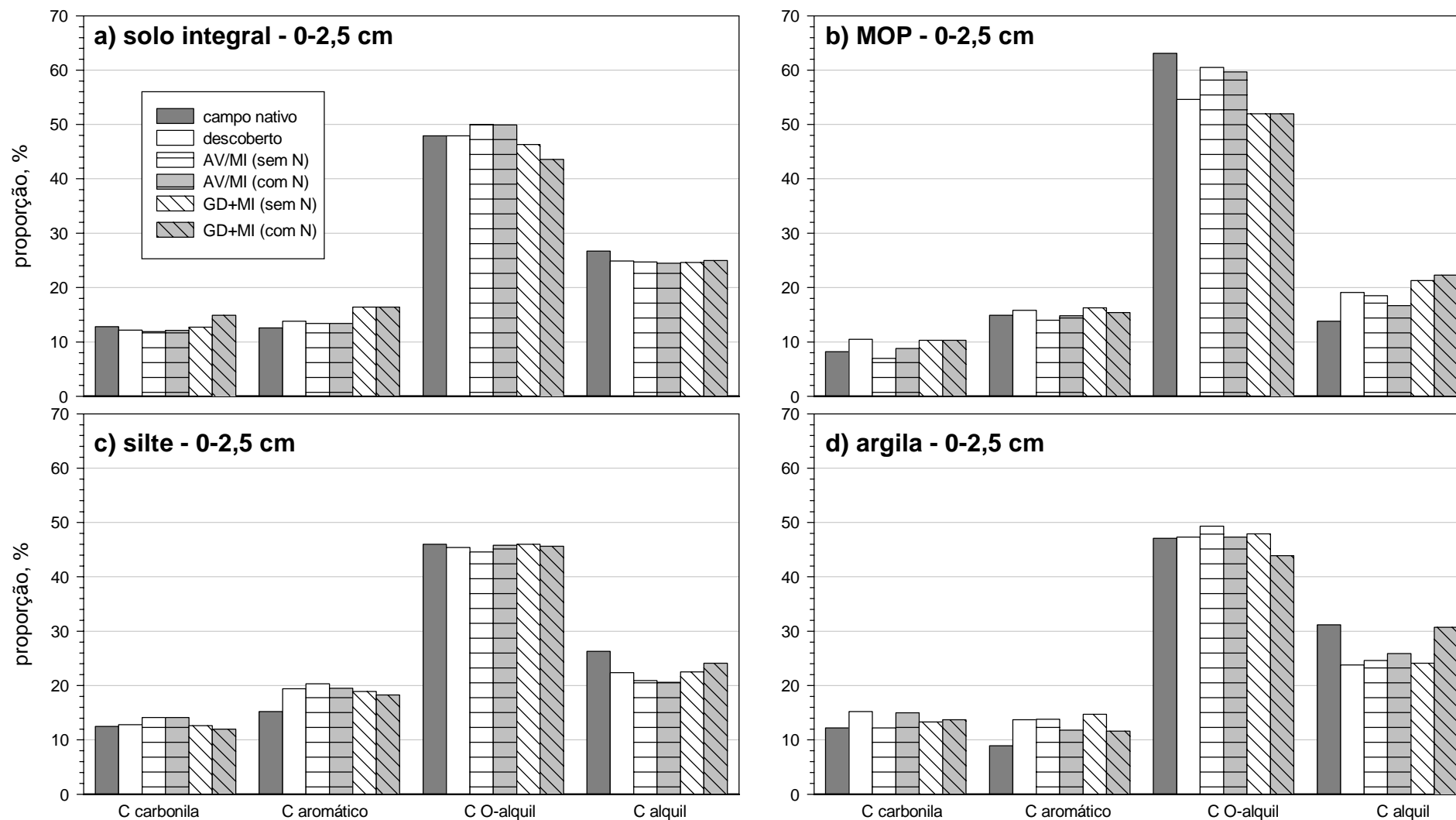


Figura 6.2. Proporção de diferentes tipos de C presentes no solo integral (a) e nas frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C CPMAS.

Tabela 6.5. Formas de N orgânico do solo integral (0-2,5 e 2,5-7,5 cm) e da fração física argila (0-2,5 cm) do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados obtidos através de hidrólise ácida com HCl 6 mol L<sup>-1</sup>.

tratamento	massa hidrolisada	N-aminoácido	N-não hidrolisado	N-NH <sub>3</sub> , -aminoaçúcar, -hidrolasado desconhecido
----- % -----				
<b>solo integral, 0-2,5 cm</b>				
campo nativo	15,7 ± 1,9	38,4 ± 4,4	25,8 ± 1,1	35,8 ± 2,0
solo descoberto	12,9 ± 4,2	37,6 ± 1,1	29,3 ± 4,8	33,1 ± 2,0
AV/MI (sem N)	14,6 ± 0,5	37,3 ± 2,8	26,3 ± 2,5	36,4 ± 5,1
AV/MI (com N)	16,0 ± 0,8	38,2 ± 2,8	25,8 ± 5,6	36,0 ± 8,4
GD+MI (sem N)	16,4 ± 1,9	36,2 ± 3,8	21,3 ± 3,9	42,5 ± 7,5
GD+MI (com N)	19,2 ± 2,2	38,2 ± 0,4	25,3 ± 3,4	36,5 ± 3,0
média	<b>15,8 ± 2,1</b>	<b>37,7 ± 0,8</b>	<b>25,6 ± 2,6</b>	<b>36,7 ± 3,1</b>
<b>argila, 0-2,5 cm</b>				
campo nativo	49,0 ± 3,7	36,0 ± 1,9	21,7 ± 2,6	42,3 ± 0,7
solo descoberto	43,3 ± 12,2	33,5 ± -	32,6 ± 16,6	33,9 ± -
AV/MI (sem N)	46,7 ± 5,6	30,0 ± 2,6	28,7 ± 6,0	41,3 ± 3,4
AV/MI (com N)	50,7 ± 1,0	30,6 ± 0,9	26,8 ± 1,3	42,6 ± 2,3
GD+MI (sem N)	49,8 ± 3,7	35,2 ± 2,3	24,3 ± 0,2	40,5 ± 2,6
GD+MI (com N)	52,3 ± 0,0	34,4 ± 0,1	23,4 ± 1,0	42,2 ± 1,1
média	<b>48,6 ± 3,2</b>	<b>33,3 ± 2,5</b>	<b>26,3 ± 4,0</b>	<b>40,5 ± 3,3</b>
<b>solo integral, 2,5-7,5 cm</b>				
campo nativo	15,2 ± 1,5	38,8 ± 1,8	27,2 ± 1,7	34,0 ± 0,4
solo descoberto	15,0 ± 0,6	34,5 ± 1,8	40,4 ± 7,1	25,1 ± 8,3
AV/MI (sem N)	14,0 ± 0,9	37,2 ± 1,0	31,4 ± 4,3	31,4 ± 5,0
AV/MI (com N)	15,1 ± 0,8	36,3 ± 2,1	31,4 ± 3,3	32,3 ± 5,1
GD+MI (sem N)	14,9 ± 0,5	36,1 ± 0,5	30,3 ± 1,2	33,6 ± 1,1
GD+MI (com N)	15,3 ± 0,6	34,8 ± 1,2	29,8 ± 1,4	35,4 ± 0,8
média	<b>14,9 ± 0,5</b>	<b>36,3 ± 1,6</b>	<b>31,8 ± 4,5</b>	<b>32,0 ± 3,6</b>

Referente a proporção da massa total atacada por hidrólise (Tabela 6.5), essa foi em torno de 15% para as amostras de solo integral, tanto na camada de 0-2,5 cm como na de 2,5-7,5 cm, e 49% para as amostras da fração argila. Esse maior ataque na fração argila indica a menor resistência dos minerais desta fração, como caulinita e óxidos de ferro, ao ataque ácido, enquanto que no solo integral, provavelmente os minerais de quartzo da fração

areia garantiram maior resistência ao ataque, de forma que a massa recuperada após a hidrólise foi maior.

Um dos temas mais intrigantes na pesquisa com N orgânico do solo diz respeito ao N-não hidrolisado e N-hidrolisado desconhecido, que juntos, em alguns casos, representam mais da metade do N total do solo (Stevenson, 1994; Schulten & Schnitzer, 1998). Vários autores reportam que esse N está contido em estruturas heterocíclicas formadas durante o processo de decomposição da matéria orgânica, a partir de material proteico e de carboidrato (Schulten & Schnitzer, 1998).

Entretanto, nos espectros de RMN-<sup>15</sup>N CPMAS, observa-se basicamente um único pico, em -256 ppm (N-amida), indicando que praticamente todo o N orgânico do solo da camada de 0-2,5 cm está contido em estruturas peptídicas de amida, inclusive as duas formas desconhecidas de N obtidas por hidrólise ácida (Figura 6.3). Resultados semelhantes foram encontrados por Knicker et al. (1993), Knicker (2000), Knicker et al. (2000b) e Knicker & Skjemstad (2000), através do emprego de RMN-<sup>15</sup>N CPMAS sobre amostras de solo, frações físicas e substâncias húmicas. Entretanto, existem alegações de que por possuir baixa sensibilidade, a espectroscopia RMN-<sup>15</sup>N não estaria detectando os possíveis compostos nitrogenados heterocíclicos, como supostamente detectados na técnica de pirólise analítica (Schulten & Schnitzer, 1998). Entretanto, vale considerar que na pirólise analítica, em função da aplicação de elevada quantidade de energia térmica, tais compostos nitrogenados heterocíclicos podem estar sendo artificialmente formados, não representando uma condição real do solo. Supondo que esses compostos sejam expressivos no solo, o questionamento que surge, baseado na mesma indagação de Burdon (2001) com relação a teoria de que substâncias húmicas são estruturas de elevado peso molecular e aromáticas condensadas, é como estruturas alifáticas como proteínas/peptídios ou aminoaçúcares poderiam ser transformadas microbiologicamente em estruturas heterocíclicas, considerando que para isso há um consumo de energia. Segundo Burdon (2001), se alguma espécie microbiana fosse capaz de fazer isso, já teria sido extinta pelo processo de seleção natural, pois não teria condições de competir com outras espécies mais eficientes energeticamente.

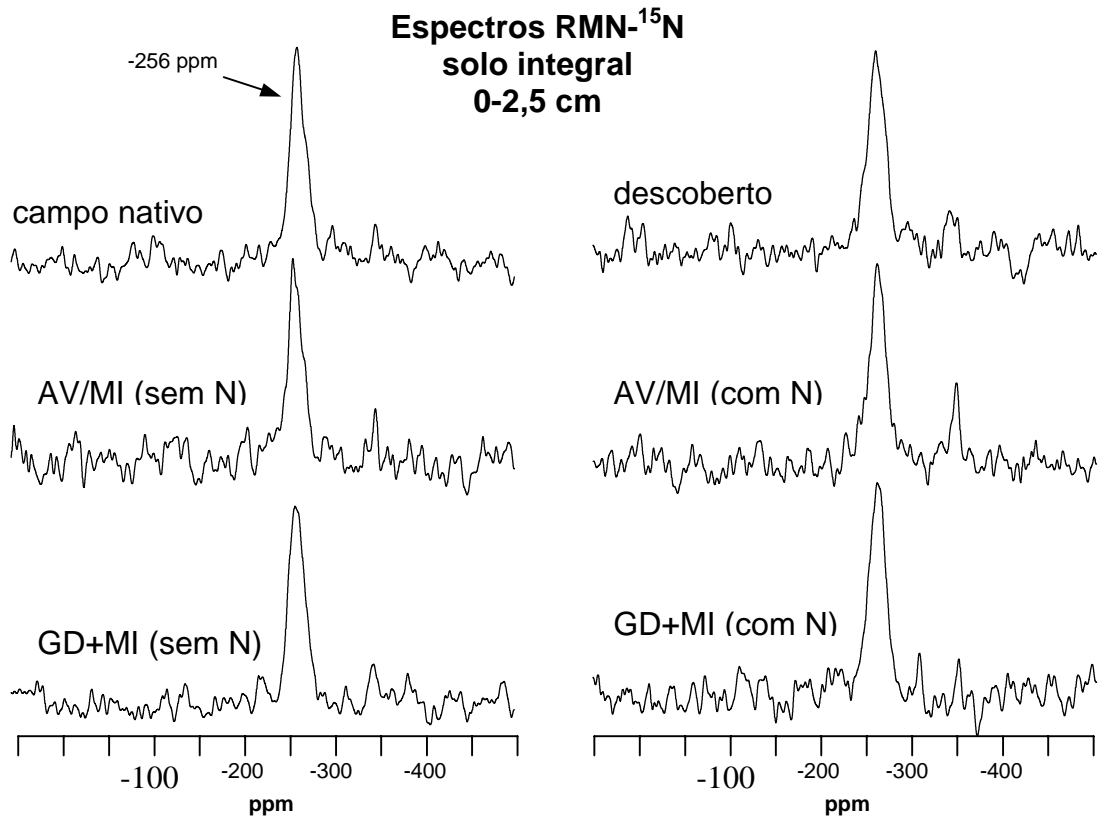


Figura 6.3. Espectros de RMN-<sup>15</sup>N CPMAS do solo integral da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. As amostras foram tratadas com HF 10%.

Um intenso trabalho para a definição dos parâmetros da técnica de RMN-<sup>15</sup>N CPMAS em amostras geoquímicas foi desenvolvido por Knicker & Lüdemann (1995) e em nenhum momento se registrou sinais perceptíveis de outros compostos nitrogenados a não ser os do tipo N-amida (-256 ppm), de estruturas peptídicas. Para explicar o fato que o N-proteico é a principal forma presente no solo, Knicker & Hatcher (1997) propuseram a teoria do “encapsulamento”, onde essa forma de N estaria protegida dentro de estruturas hidrofóbicas da matéria orgânica do solo. Os autores também levantam a possibilidade de proteção por interação com superfícies de argila (proteção coloidal) e dentro de microporos (proteção física). A teoria do “encapsulamento” de N-proteico também foi sugerida em estudos de Zang et al. (2000).

Referente a influência do manejo sobre a qualidade da matéria orgânica do solo, observa-se que as diferenças foram mínimas entre os sistemas de culturas em si e o campo nativo, conforme os dados de RMN-<sup>13</sup>C (Figura 6.2a, 6.4a) e RMN-<sup>15</sup>N (Figura 6.3) para a camada de 0-2,5 cm. Em trabalhos anteriores realizados no mesmo experimento deste estudo, a fração ácido húmico dessa camada tendeu a apresentar, entretanto, uma maior proporção de C O-alkil e menor de C alkil nos sistemas GD+MI e campo nativo em relação aos sistemas AV/MI e pousio/milho (Pillon, 2000), enquanto que o solo descoberto apresentou o maior índice de aromaticidade (Ceretta, 1995). Os autores explicam tais resultados em função das diferentes quantidades de resíduo adicionadas por esses sistemas de culturas.

A concentração de N-aminoácido na camada de 0-2,5 cm também foi similar entre os tratamentos avaliados (Tabela 6.5), o que concorda perfeitamente com resultados obtidos por Ceretta (1995), na mesma área experimental. Porém no solo descoberto a concentração de N-não hidrolisado tendeu a ser maior (Tabela 6.5), concordando com citações de Schulten & Schnitzer (1998), que relatam maior proporção de N-não hidrolisado em solos intensamente preparados ou não adubados, com baixos estoques de matéria orgânica. A maior proporção de N-não hidrolisado não significa necessariamente uma diferença na qualidade do material orgânico, mas pode sim indicar que maior proporção da matéria orgânica está protegida coloidalmente, o que estaria dificultando a liberação dos compostos nitrogenados durante o processo hidrolítico.

Embora as técnicas de RMN-<sup>13</sup>C, RMN-<sup>15</sup>N e hidrólise ácida não tenham evidenciado diferenças qualitativas expressivas na matéria orgânica da camada superficial do solo dos sistemas de culturas e do campo nativo, o mesmo não pode ser afirmado com relação aos dados de pirólise analítica (Figura 6.5). Observa-se nos pirogramas que há uma distinção na composição da MOS do sistema GD+MI em relação aos demais sistemas. Os picos de número 14, 19, 20, 22, 23 e 26 (Figura 6.5), derivados de material fenólico/aromático (Tabela 6.6), 24 e 27, derivados de material proteico e 29 e 30, derivados de material alifático de cadeia longa, estão presentes ou são mais intensos no solo do sistema GD+MI, tanto sem N como com N.



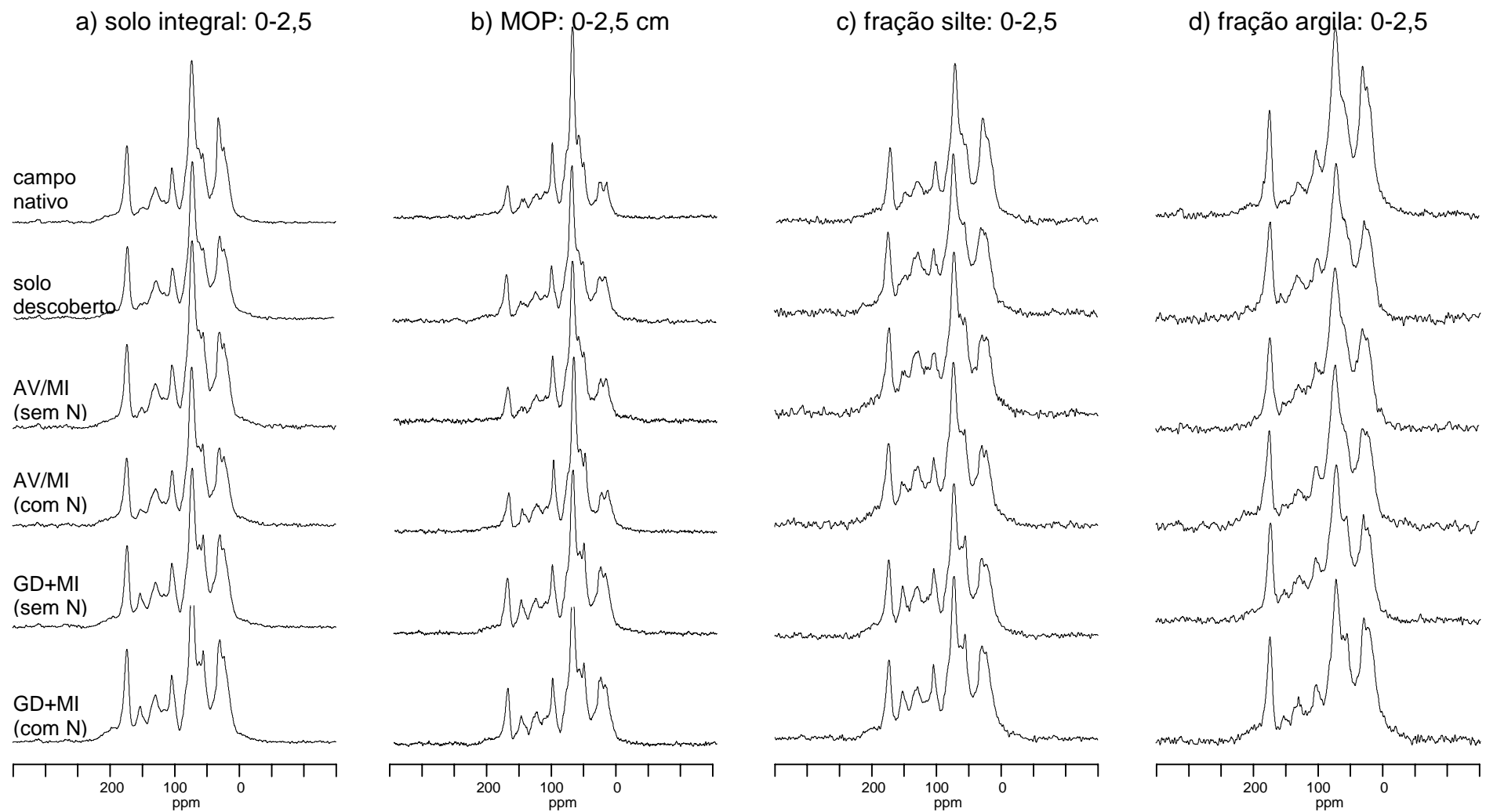


Figura 6.4. Espectros de RMN- $^{13}\text{C}$  CP-MAS do solo integral (a) e das frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

## Solo integral: 0-2,5 cm

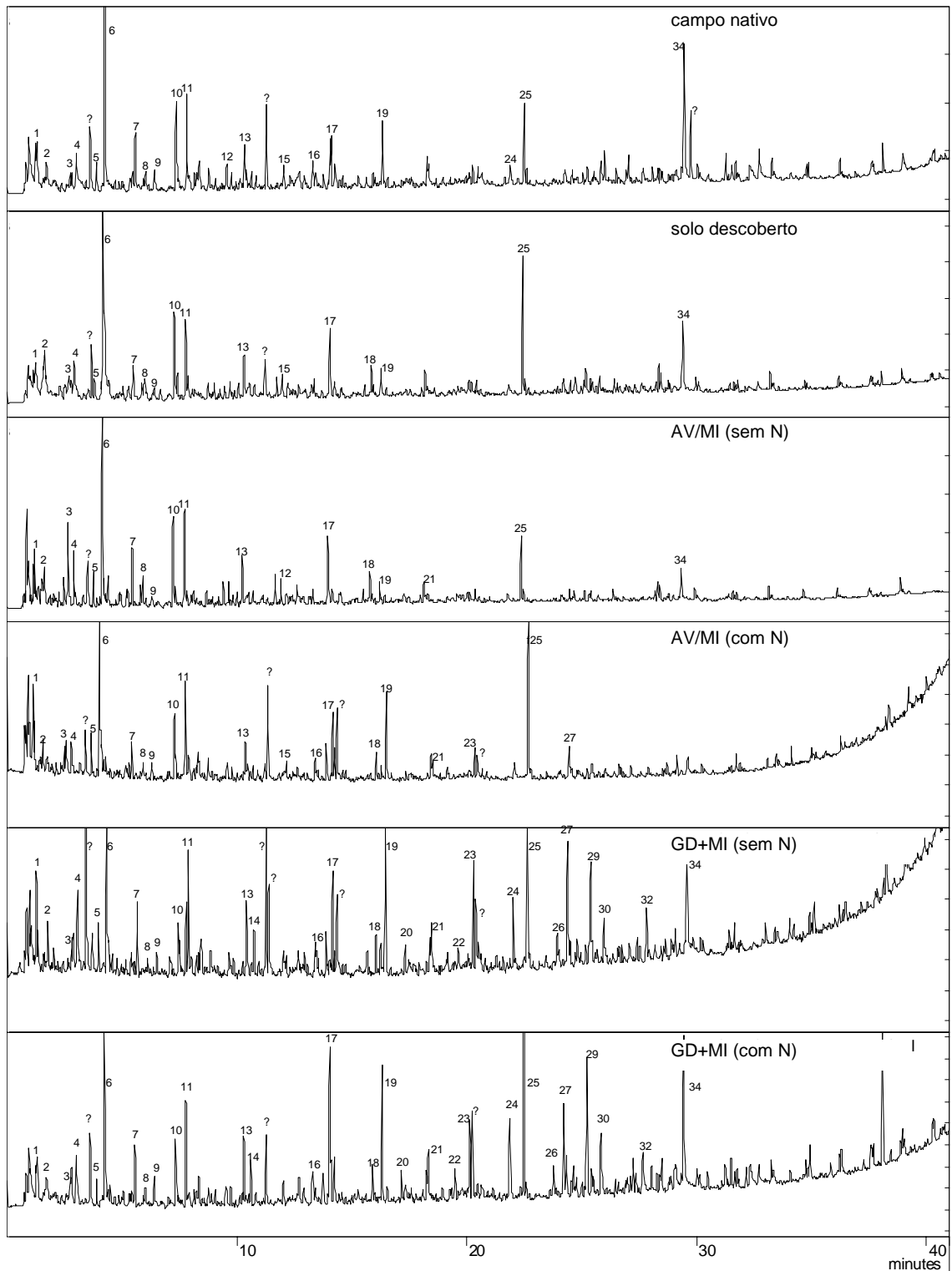


Figura 6.5. Pirogramas do solo integral da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de pirólise analítica (Py-GC/MS). Os possíveis compostos (fragmentos de pirólise) que os picos enumerados representam estão listados na Tabela 6.6 e os respectivos espectros de massa no Apêndice 25.

Tabela 6.6. Identificação dos picos nos pirogramas obtidos por pirólise analítica (Py-GC/MS) <sup>1/</sup>.

n.º pico	posição (minutos)	provável composto <sup>2/</sup>	provável material de origem			
			carboidrato	proteico	aromático	alquil
1	1,3	1H-pirazol		x		
2	1,7	benzeno			x	
3	2,8	3-propil-ciclopenteno	x			
4	3,0	tolueno			x	
5	3,9	3-furaldeido	x			
6	4,2	2-furaldeido	x			
7	5,6	estireno			x	
8	6,0	2-etil-5-metil-furano	x			
9	6,4	oxazole		x		
10	7,3	5-metil-2-furanocarboxaldeido	x			
11	7,8	fenol		x	x	
12	9,6	composto com tolueno			x	
13	10,3	2-metil-fenol		x	x	
14	10,6	2-metoxi-fenol			x	
15	12,0	composto com indol (?)		x		
16	13,6	1,4-dimetoxi-benzeno			x	
17	14,0	2-metil-benzaldeido			x	
18	15,9	indol		x		
19	16,3	composto fenólico			x	
20	17,2	3,4-dimetoxi-fenol			x	
21	18,3	vanilina (lignina)			x	
22	19,5	fenol com grupos metoxi			x	
23	20,1	composto aromático			x	
24	21,9	composto com benzotriazol		x		
25	22,5	ftalato (contaminante)				
26	23,8	composto com benzaldeido			x	
27	24,2	composto nitrogenado		x		
28	24,7	2,6-dimetoxi-fenol			x	
29	25,2	alifático de cadeia longa				x
30	25,8	alifático de cadeia longa				x
31	27,3	ácido octadecanóico				x
32	27,6	ftalato (?)				
33	28,0	alifático de cadeia longa				x
34	29,5	ácido hexadecanóico				x
35	32,3	alifático de cadeia longa				x

<sup>1/</sup> Os picos foram identificados através dos programas computacionais Saturn GC/MS Workstation e a NIST Mass Spectral Database, além de comparações com trabalhos da literatura (Saiz-Jimenez et al., 1996; Gonzáles-Vila et al., 2001; Nierop et al., 2001; Chefetz et al., 2002).

<sup>2/</sup> Os espectros de massa correspondentes a cada pico são apresentados no Apêndice 25.

## MOP: 0-2,5 cm

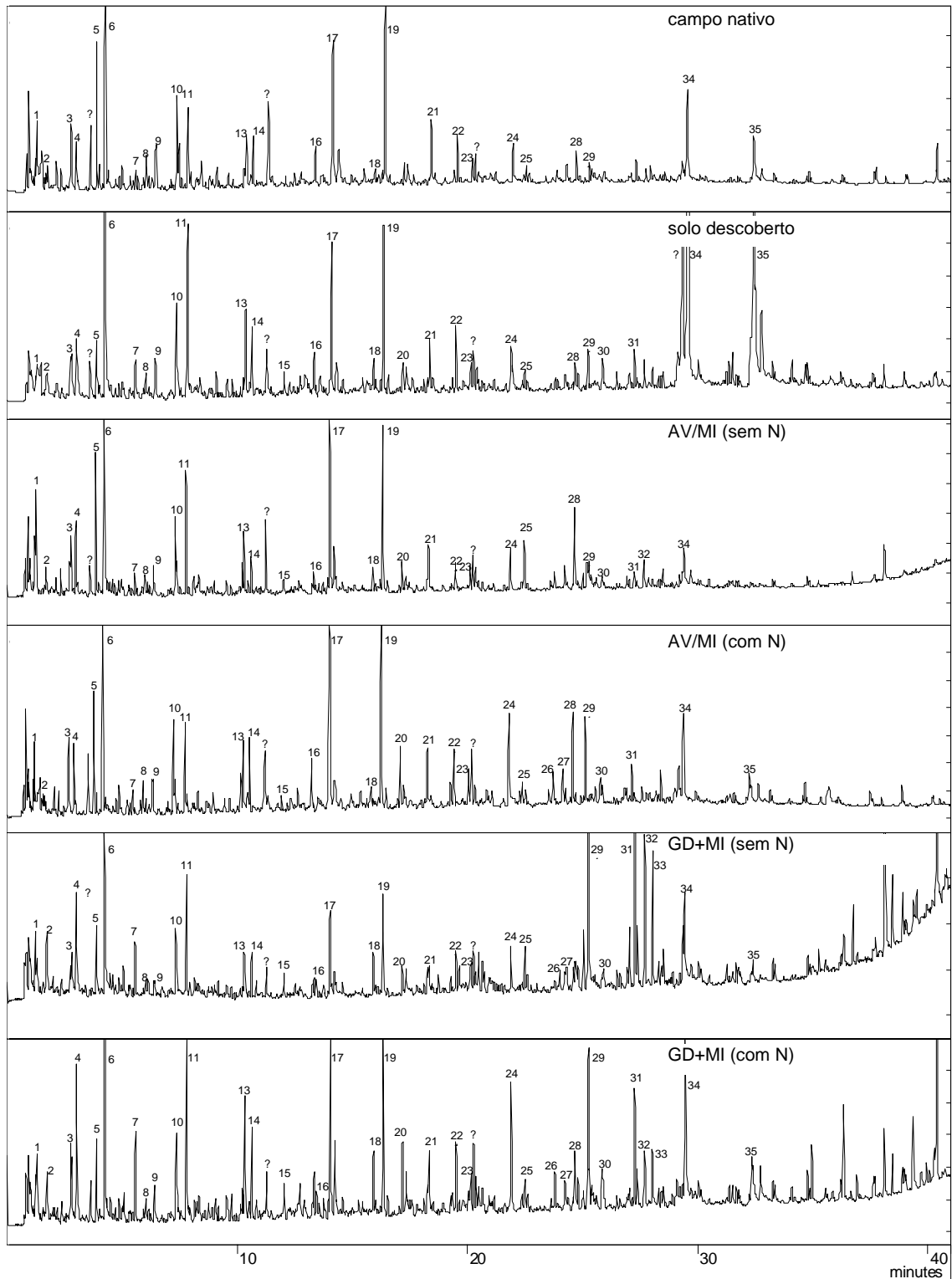


Figura 6.6. Pirogramas da fração física MOP da camada de 0-2,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de pirólise analítica (Py-GC/MS). Os possíveis compostos (fragmentos de pirólise) que os picos enumerados representam estão listados na Tabela 6.6 e os respectivos espectros de massa no Apêndice 25.

É importante observar que esses picos estão presentes também na MOP de quase todos os sistemas (Figura 6.6). Como no sistema GD+MI a MOP representa entre 27-30% do estoque total de C na camada de 0-2,5 cm (Figura 5.4, Estudo II), pode se inferir que é a presença dessa fração que está determinando as distinções qualitativas na matéria orgânica do solo integral desse sistema, segundo os dados de pirólise analítica.

Numa observação minuciosa dos espectros de RMN-<sup>13</sup>C do solo integral (Figura 6.4a), também é possível verificar uma maior intensidade dos picos correspondentes a C aromático derivado de lignina, como C metoxila (ombro em 56 ppm) e C fenólico (150 ppm), no sistema GD+MI em relação aos demais tratamentos.

O fato da técnica de pirólise analítica detectar mais claramente as diferenças entre os sistemas pode estar relacionada com seu maior grau de detalhamento em relação as demais técnicas (RMN-<sup>13</sup>C, RMN-<sup>15</sup>N e hidrólise ácida). Enquanto a espectroscopia de RMN ou a hidrólise ácida visam determinados grupos de compostos orgânicos, a pirólise visa o composto. Por exemplo, dentro do grupo dos carboidratos existe uma heterogeneidade composicional significativa, que na pirólise provavelmente é refletida em diversos picos, embora não se saiba exatamente que composto cada pico represente. Enquanto isso, na técnica de RMN-<sup>13</sup>C essa heterogeneidade dos carboidratos é representada simplesmente como C O-alkil, face as dificuldades de um maior detalhamento devido a sobreposição dos sinais. Outro exemplo seria a concentração similar de N-aminoácido, determinado por hidrólise, em diferentes tratamentos, mas que na verdade envolvem aminoácidos completamente diferentes, que na pirólise podem aparecer em distintos picos.

O nível de detalhamento de uma análise qualitativa da matéria orgânica do solo deve ser definido em função do objetivo que se pretende com o trabalho. Se a intenção é avaliar a influência do manejo do solo sobre a qualidade da matéria orgânica, como no caso deste estudo, é provável que as proporções de material aromático, carboidrato, alifático ou carbonílico obtidas por RMN-<sup>13</sup>C sejam suficientes para se chegar a uma conclusão. Porém, quando se pretende conhecer a concentração de um composto em especial, outras técnicas mais sensíveis e específicas precisam ser empregadas.

Na camada de 2,5-7,5 cm, a composição da matéria orgânica foi similar àquela observada na camada superior de 0-2,5 cm, segundo os dados de RMN-<sup>13</sup>C (Figuras 6.7a, 6.2a), com proporções médias de 45% de C O-alquil, 25% de C alquil, 15% de C aromático e 15% de C carbonila, evidenciando novamente a importância dos carboidratos como constituintes da MOS. A proporção de N-aminoácido também foi similar a da camada superior, com um valor médio de 36,3% (Tabela 6.5). Porém a proporção de N-não hidrolisado aumentou de 25,6%, na camada de 0-2,5 cm, para 31,8%, na camada de 2,5-7,5 cm. Como nessa camada a concentração de C e N é menor que na camada superior (Tabela 4.1, Estudo I), é provável que maior proporção de matéria orgânica esteja protegida coloidalmente, dificultando a liberação de N orgânico por hidrólise.

A composição da matéria orgânica do solo integral da camada de 2,5-7,5 cm, assim como da camada superior, também foi similar entre o solo do campo nativo e os sistemas de culturas, conforme os resultados de RMN-<sup>13</sup>C (Figura 6.7a, 6.8a). Houve somente uma tendência do solo do campo nativo conter maior proporção de C O-alquil e menor de C aromático e C carbonila (Figura 6.7a), provavelmente por influência das frações MOP e silte (Figura 6.7b, 6.7c). Para N-aminoácido (Tabela 6.5), as proporções também foram relativamente similares, porém com uma tendência do campo nativo e do solo descoberto possuírem a maior e a menor proporção, respectivamente. Para N-não hidrolisado, novamente o solo descoberto apresentou a maior proporção (Tabela 6.5), pelas mesmas razões dadas para a camada superior.

Na camada mais profunda de 37,5-47,5 cm a qualidade da matéria orgânica também foi praticamente a mesma entre os tratamentos (Figura 6.9a, 6.10a), apresentando uma proporção média de 42% de C O-alquil, 24% de C alquil, 19% de C aromático e 15% de C carbonila. Em relação as duas camadas superficiais (Figuras 6.2a, 6.7a), no subsolo houve um incremento na proporção de C aromático (Figura 6.9a), devido principalmente a elevada proporção desse tipo de C na fração silte, que será discutida mais adiante.

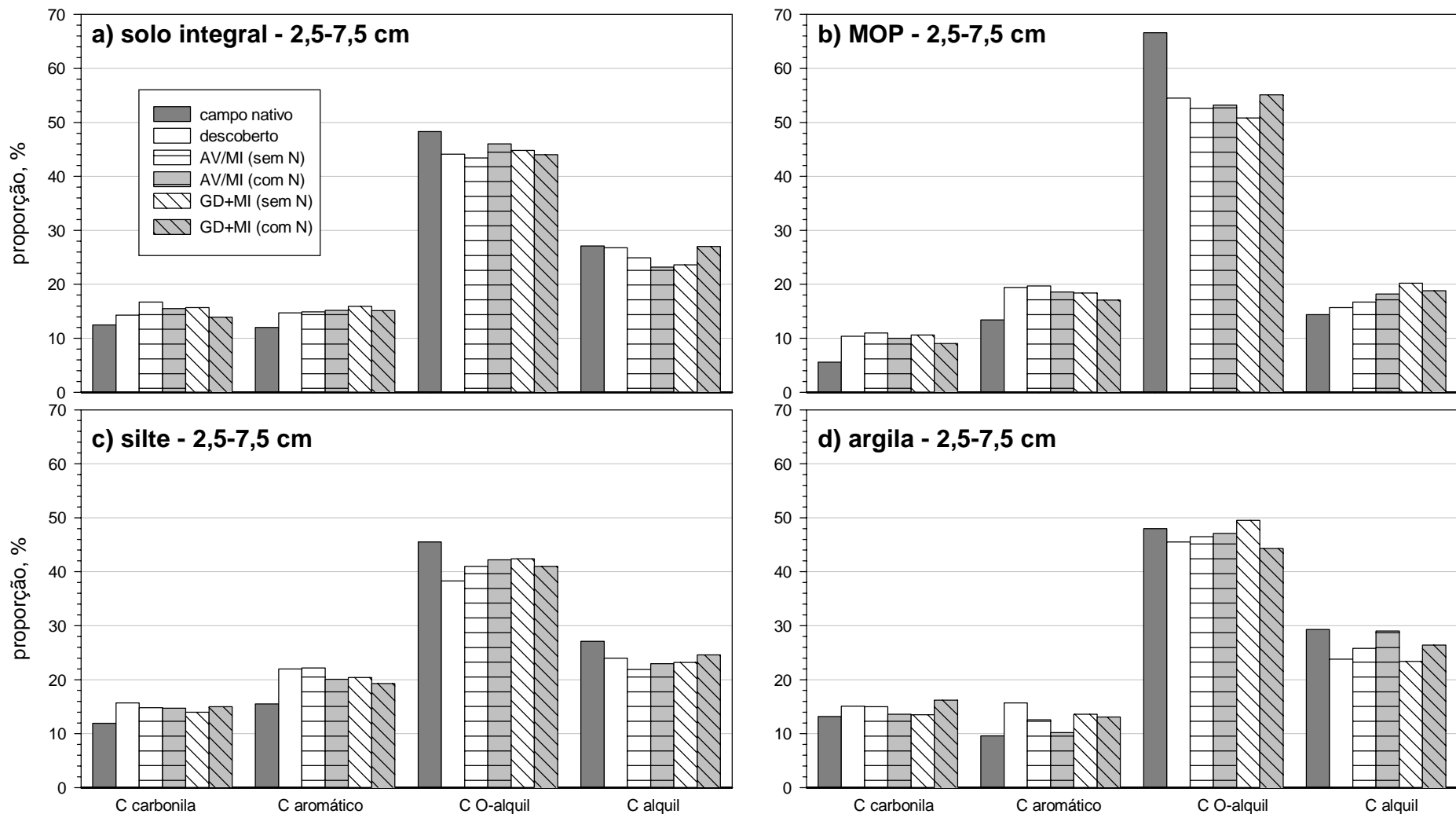


Figura 6.7. Proporção de diferentes tipos de C presentes no solo integral (a) e nas frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 2,5-7,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN- $C^{13}$  CPMAS.

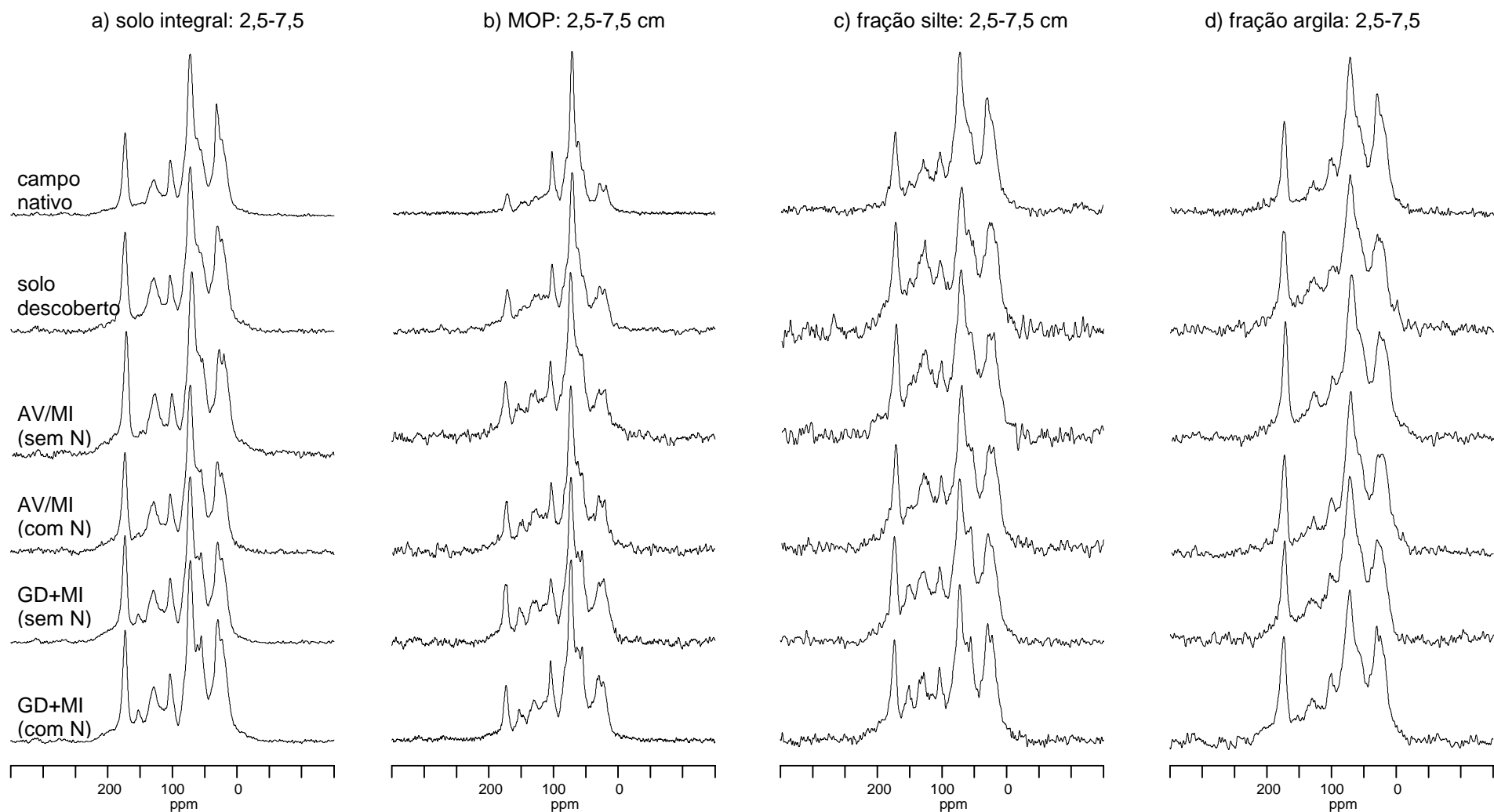


Figura 6.8. Espectros de RMN-<sup>13</sup>C CP-MAS do solo integral (a) e das frações MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 2,5-7,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.



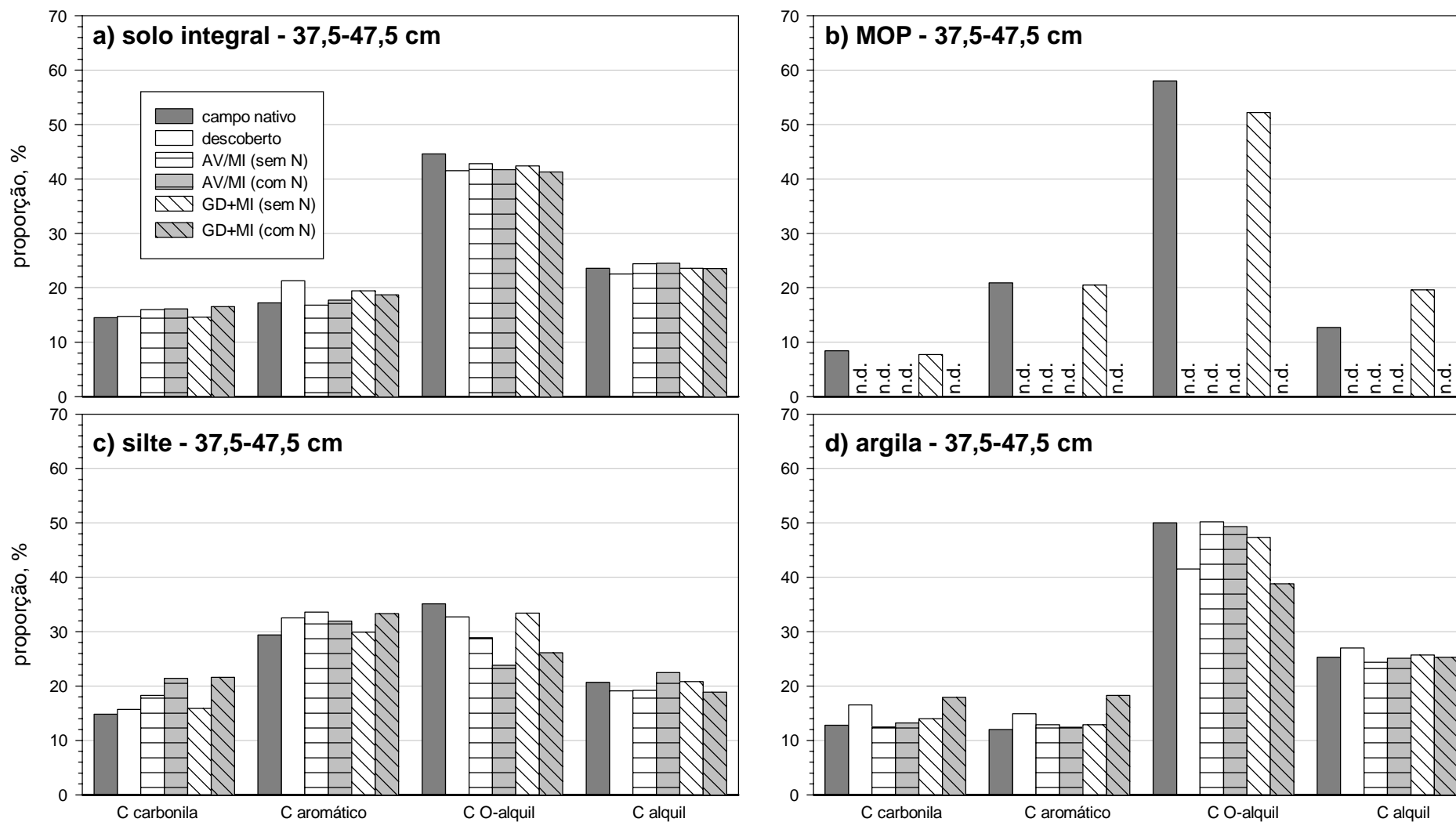


Figura 6.9. Proporção de diferentes tipos de C presentes no solo integral (a) e nas frações MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 37,5-47,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de espectroscopia RMN-C<sup>13</sup> CPMAS. n.d. = não determinado devido a quantidade insuficiente de amostra.

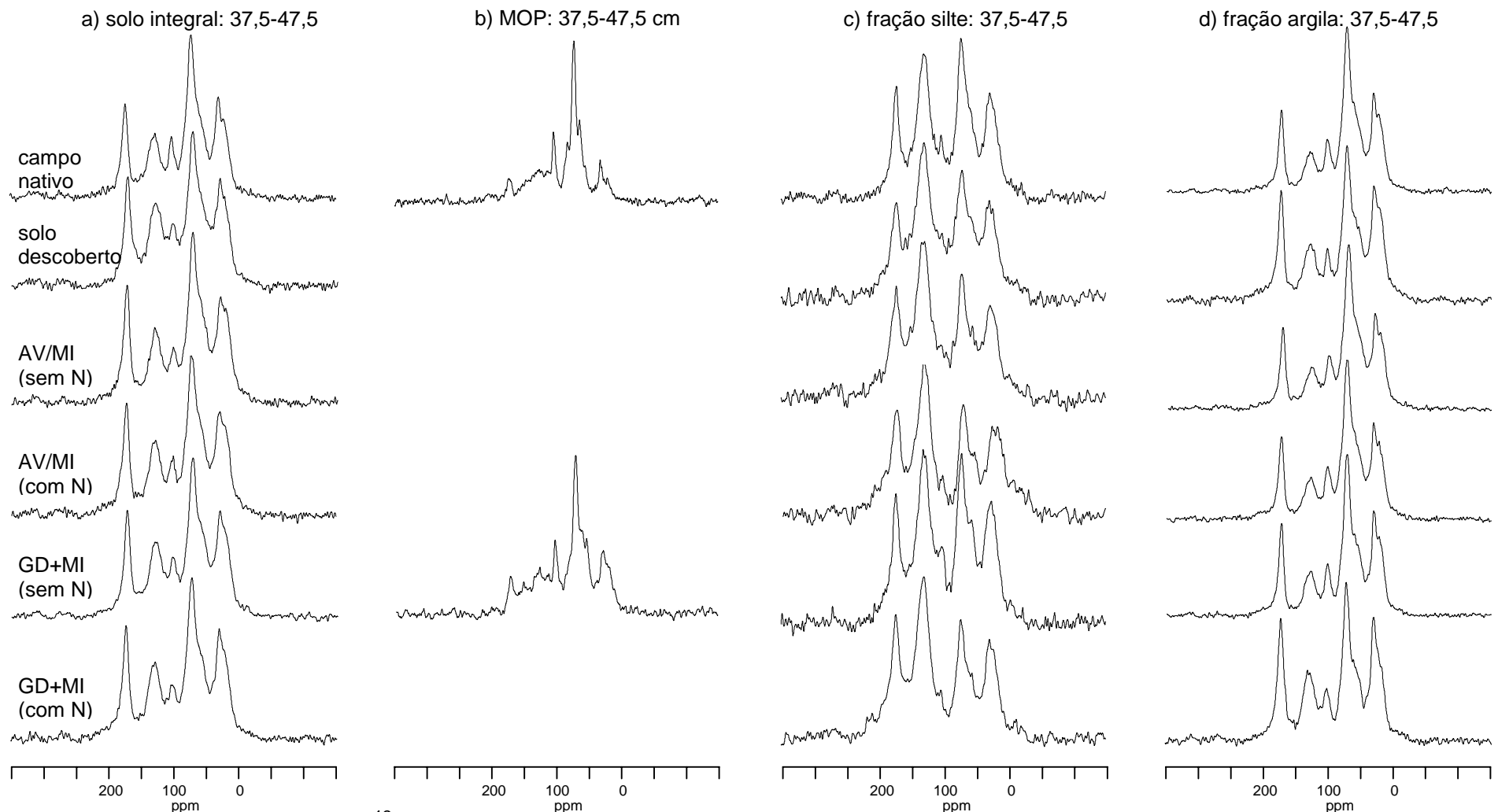


Figura 6.10. Espectros de RMN-<sup>13</sup>C CP-MAS do solo integral (a) e das frações físicas MOP (b), silte (c) e argila (d) da camada de 37,5-47,5 cm do solo do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

### 6.3.2.2. Matéria orgânica particulada (MOP)

Nas três camadas investigadas, a MOP constituiu principalmente de carboidratos, representados por carbono do tipo C O-alkil (Figuras 6.2b, 6.7b, 6.9b), cujos sinais de ressonância ocorrem em 72 ppm e 104 ppm (Figuras 6.4b, 6.8b, 6.10b). Na camada superficial (Figura 6.2b), a distribuição média dos diferentes tipos de C foi de 57% para C O-alkil, 19% para C alkil, 15% para C aromático e 9% para C carbonila. Em relação a composição das respectivas plantas (Tabela 6.4), a MOP de cada sistema apresentou menor proporção de C O-alkil e maior proporção dos demais tipos de C (Figura 6.2b), o que reflete o processo de decomposição ocorrido sobre o material vegetal.

A MOP da camada de 0-2,5 cm teve sua composição afetada pelos diferentes sistemas de culturas (Figura 6.2b, 6.4b), refletindo aproximadamente a tendência observada para a composição da parte aérea de plantas (Tabela 6.4). O sistema GD+MI apresentou a maior proporção de C alkil (Figura 6.2b), provavelmente em função da maior proporção desse tipo de C também na parte aérea de plantas de guandu (Tabela 6.4). Enquanto isso, a menor proporção de C alkil foi observada no campo nativo e as proporções intermediárias nos sistemas solo descoberto e AV/MI (Figura 6.2b). Numa tendência oposta a verificada para o C alkil, a proporção de C O-alkil foi maior no campo nativo, intermediária no descoberto e AV/MI e menor no sistema GD+MI (Figura 6.2b). Para C aromático e C carbonila não houveram tendências claras de distinção entre os tratamentos (Figura 6.2b). Esses resultados reforçam os obtidos por Pillon (2000), onde na fração leve livre da matéria orgânica, equivalente a MOP deste estudo, o sistema GD+MI também apresentou a maior proporção de C alkil e a menor de C O-alkil, ocorrendo o contrário para o campo nativo (menor proporção de C alkil e maior de C O-alkil), inclusive com valores semelhantes entre os dois estudos.

Diferenças na composição da MOP também foram observadas pela técnica de pirólise analítica (Figura 6.6), principalmente entre o sistema GD+MI (sem N e com N) e os demais tratamentos. Nesse sentido, verifica-se na MOP do GD+MI uma maior intensidade dos picos de número 2, 4 e 7, derivados de material fenólico/aromático (Tabela 6.6), dos picos 15 e 18, derivados de material proteico e dos picos 29, 31 e 33, derivados de compostos alifáticos de

cadeia longa. Por outro lado, a intensidade do pico n.º 5, derivado de carboidratos, tendeu a ser menor no sistema GD+MI em relação ao campo nativo e AV/MI (Figura 6.6). A maior intensidade dos picos referentes ao material alifático de cadeia longa (29, 31 e 33) e a tendência de menor intensidade para o pico de carboidrato (5) no sistema GD+MI concordam com os resultados de RMN-<sup>13</sup>C (Figuras 6.2b, 6.4b), expressos numa maior proporção de C alquil e menor de C O-alquil na MOP do referido sistema. Embora a maior intensidade dos picos de material fenólico/aromático obtidos na pirólise não foi refletida numa maior proporção de C aromático total por RMN-<sup>13</sup>C (Figura 6.2b), observando-se detalhadamente os espectros de RMN <sup>13</sup>C (Figura 6.4b), nota-se uma maior intensidade do sinal do C fenólico (150 ppm) no sistema GD+MI em relação aos demais sistemas, o que de certa forma vem a concordar com os dados de pirólise analítica.

A composição da MOP na camada de 2,5-7,5 cm (Figura 6.7b, 6.8b) foi similar à observada na camada superior (Figura 6.2b, 6.4b), com a exceção de uma tendência de diminuição da proporção de C O-alquil e aumento de C aromático no sistema AV/MI (sem N e com N), que pode estar relacionada com diferenças de composição entre o resíduo da parte aérea e o resíduo radicular da aveia. Na camada mais profunda de 37,5-47,5 cm dos tratamentos que puderam ser avaliados (Figura 6.9b), a MOP tendeu a possuir maior proporção de C aromático e menor de C O-alquil em relação as camadas superiores (Figuras 6.2b, 6.7b). Isso pode estar associado com a maior relação lignina/N do resíduo de raízes (Balesdent & Balabane, 1996) ou com a presença de carvão, como será visto adiante para a fração silte.

A relação C:N da MOP (Tabela 5.5, Estudo II) também ilustra diferenças na composição dessa fração entre os tratamentos, seguindo a tendência observada para a relação C:N da parte aérea de plantas. Nesse sentido, a MOP do campo nativo apresentou o maior valor de relação C:N, enquanto que o sistema GD+MI o menor e o solo descoberto e AV/MI os valores intermediários (Tabela 5.5, Estudo II).

A distinta composição da MOP em sistemas de manejo que envolvem diferentes espécies vegetais também foi observada por Oades et al. (1988), Golchin et al. (1995) e Guggenberger et al., (1994). Nos trabalhos de Oades et al. (1988) e Golchin et al. (1995), em Alfisolo e Vertisolo Australiano,

os autores verificaram maior proporção de C aromático e menor de C O-alquil na fração leve do solo manejado no sistema trigo/pousio em relação ao manejado sob pastagem de gramíneas+leguminosas. Através da técnica de oxidação por CuO, Guggenberger et al. (1994) também encontraram maior concentração de lignina na fração areia do solo sob pastagem permanente (gramíneas) em relação ao solo manejado sob uma rotação com cereais (trigo, cevada e milho).

### **6.3.2.3. Fração silte**

A matéria orgânica da fração silte das camadas de 0-2,5 cm (Figura 6.2c) e 2,5-7,5 cm (Figura 6.7c) de todos os tratamentos apresentou uma proporção média de 45% de C O-alquil, 23% de C alquil, 19% de C aromático e 13% de C carbonila. Entre os três sistemas de culturas sob plantio direto, as diferenças na qualidade da matéria orgânica da fração silte também foram mínimas em ambas camadas (Figuras 6.2c, 6.7c), porém o campo nativo tendeu a possuir maior proporção de C alquil e menor de C aromático. A maior proporção de C alquil na fração silte do campo nativo (Figura 6.2c, 6.7c) contrasta com a tendência desse sistema possuir a menor proporção de C alquil na MOP (Figura 6.2b, 6.7b). Isso é um indicativo de que a qualidade da matéria orgânica da fração silte não necessariamente seja controlada pelas características da MOP.

Mas em função da presença de MOP também na fração silte (Figura 5.3, Estudo II) e considerando que essa é qualitativamente diferente entre os sistemas de culturas, seria lógico supor que a fração silte também apresentasse diferenças qualitativas entre os sistemas de culturas. Mas cabe considerar dois aspectos. O primeiro é que a matéria orgânica da fração silte não é constituída unicamente por material particulado, mas sim por uma mistura desse com a fração humificada associada aos minerais. O segundo é que nem todo o material particulado é derivado de plantas, ocorrendo também a presença de fragmentos de microrganismos, como hifas de fungos (Figura 5.3, Estudo II). Nesse caso, o material particulado derivado de plantas representa uma porção muito reduzida no estoque total de matéria orgânica da fração silte, de maneira que suas características composicionais não sejam expressas na fração silte como um todo.

Na camada de 37,5-47,5 cm (Figuras 6.9c, 6.10c) não houve uma tendência clara dos diferentes sistemas de cultura (sem N) afetarem a qualidade da matéria orgânica da fração silte. Entretanto a proporção de C aromático foi em média 71% superior em relação as duas camadas superficiais (Figuras 6.2c, 6.7c). A elevada concentração de material aromático na fração silte da camada de 37,5-47,5 cm é expressa através da intensidade do sinal de 130 ppm nos espectros de RMN-<sup>13</sup>C (Figura 6.10c), correspondente ao C aromático H-, C-substituído, que Skjemstad et al. (1996) e Ponomarenko & Anderson (2001) referem como podendo ser derivado de material carbonizado (carvão). Através de microscopia óptica (Figura 6.11), verificou-se a presença de grânulos pretos nessa fração, o que junto com as informações espectrais confirma a presença de carvão na mesma, derivado provavelmente de queimas da vegetação ocorridas no passado, quando o solo ainda estava sob vegetação de campo nativo. É muito provável que o carvão também esteja presente nas camadas superficiais de solo, porém devido ao maior estoque de matéria orgânica nessas, a proporção de C-carvão é menor, o que dificulta sua detecção.

Visando obter informações sobre a contribuição da lignina na quantidade de material aromático da amostra, e a partir disso inferir sobre a presença de material aromático não-lignínico (carvão), calculou-se o valor médio da razão (C fenólico)/(C C-,H-substituído) para a fração silte de cada uma das três camadas. Utilizou-se os dados originais de concentração de C fenólico (160-140 ppm) e de C aromático C-,H-substituído (110-140 ppm), apresentados nos Apêndices 21, 22 e 23, para as camadas de 0-2,5 cm, 2,5-7,5 cm e 37,5-47,5 cm, respectivamente. A razão (C fenólico)/(C C-,H-substituído) diminuiu de 0,44-0,46, nas duas camadas superficiais, para 0,34, na camada de 37,5-47,5 cm, indicando a menor contribuição de material lignínico na composição aromática dessa última, paralelo a uma maior proporção de materiais condensados derivados de carvão.

Conforme estudos realizados em solos australianos (Skjemstad et al., 1996) e americanos (Skjemstad et al., 2002), o carvão derivado da queima da vegetação pode representar até 30-35% do estoque total de C do solo, enquanto que para alguns Chernossolos europeus essa proporção pode ser de até 45% (Schmidt et al. 1999). A quantificação do C na forma de carvão é

baseada na técnica de fotoxidação com radiação ultravioleta das frações físicas do solo, seguida por análise espectroscópica de RMN-<sup>13</sup>C (Skjemstad et al., 1996; Skjemstad et al., 2002). A ocorrência de carvão está geralmente associada com frações granulométricas < 50 µm, em camadas do solo de até 30 cm de profundidade (Skjemstad et al., 2001). Provavelmente a presença de carvão em camadas do subsolo é devido a processos de bioturbação, promovidos por organismos do meso- e macro-fauna do solo, que transportam o material carbonizado a partir da superfície, onde ele é formado, para as maiores profundidades. Skjemstad et al. (1996) enfatizam a importância de se considerar a presença de carvão no solo, pois essa forma de C pode contribuir significativamente para o “pool” passivo da matéria orgânica.

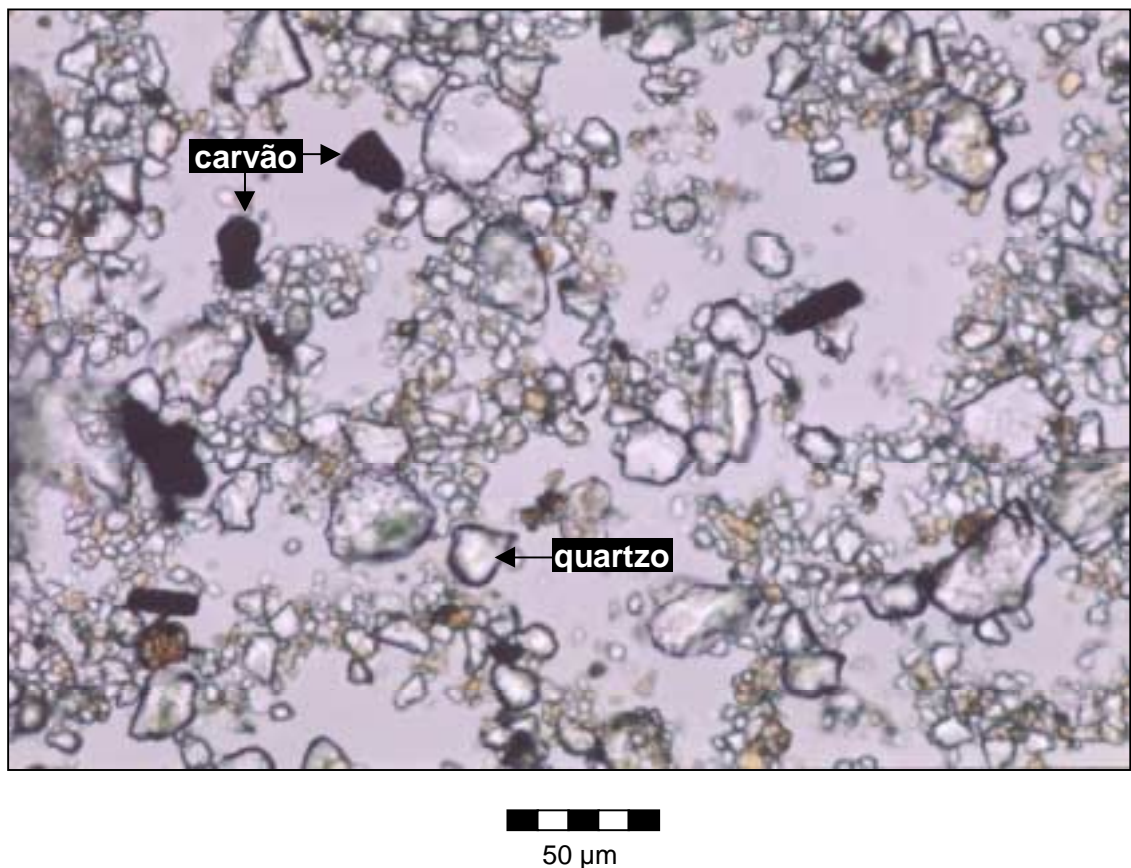


Figura 6.11. Micrografia da fração silte do sistema GD+MI (sem N) da camada de 37,5-47,5 cm. Os demais tratamentos apresentaram micrografias muito semelhantes a esta.

#### 6.3.2.4. Fração argila

A fração argila da camada superficial de 0-2,5 cm (Figura 6.2d) apresentou uma proporção média de 47% de C O-alquil, 27% de C alquil, 14% de C carbonila e 12% de C aromático. Cabe ressaltar a significativa contribuição dos carboidratos na composição da matéria orgânica também desta fração, protegidos provavelmente pelos mecanismos de proteção coloidal e proteção física. Isso concorda com as conclusões de Skjemstad et al. (1986), Capriel et al. (1992) e Bayer (1996) de que a recalcitrância molecular não é o principal mecanismo de estabilização da matéria orgânica, mas sim a proteção físico-coloidal, promovida pelos complexos organo-minerais primários e microagregados.

Assim como observado para os dados de RMN-<sup>13</sup>C da fração silte da camada de 0-2,5 cm (Figura 6.2c), a composição da matéria orgânica da fração argila (Figura 6.2d, 6.4d) também foi similar entre os sistemas de culturas sem N. Da mesma forma ocorreu uma clara tendência do campo nativo conter maior proporção de C alquil e menor de C aromático (Figura 6.2d). Essa maior proporção de C alquil na fração argila do campo nativo em relação ao solo cultivado discorda do resultado de Preston et al. (1994), que encontraram menor proporção de C alquil na fração argila do campo nativo em relação ao solo cultivado por 65 anos, alegando que o C alquil representa uma porção mais estável da matéria orgânica.

Pelos dados de hidrólise ácida (Tabela 6.5), o campo nativo tendeu a possuir a maior proporção de N-aminoácido e a menor de N-não hidrolisado em relação aos demais tratamentos. Entre os sistemas de culturas a proporção de N-aminoácido diminuiu na ordem GD+MI > solo descoberto > AV/MI (Tabela 6.5). Quanto ao N-não hidrolisado, novamente o solo descoberto apresentou a maior proporção dessa forma. Vale salientar novamente que esses resultados não significam necessariamente diferenças na qualidade da matéria orgânica, mas sim diferenças no grau de proteção físico-coloidal desta, o qual influi na proporção hidrolisada e não hidrolisada.

Pelos pirogramas da fração argila (Figura 6.12), também percebe-se uma similaridade na qualidade da matéria orgânica entre os sistemas. Entretanto nos pirogramas do solo descoberto ocorreram picos mais



## argila: 0-2,5 cm

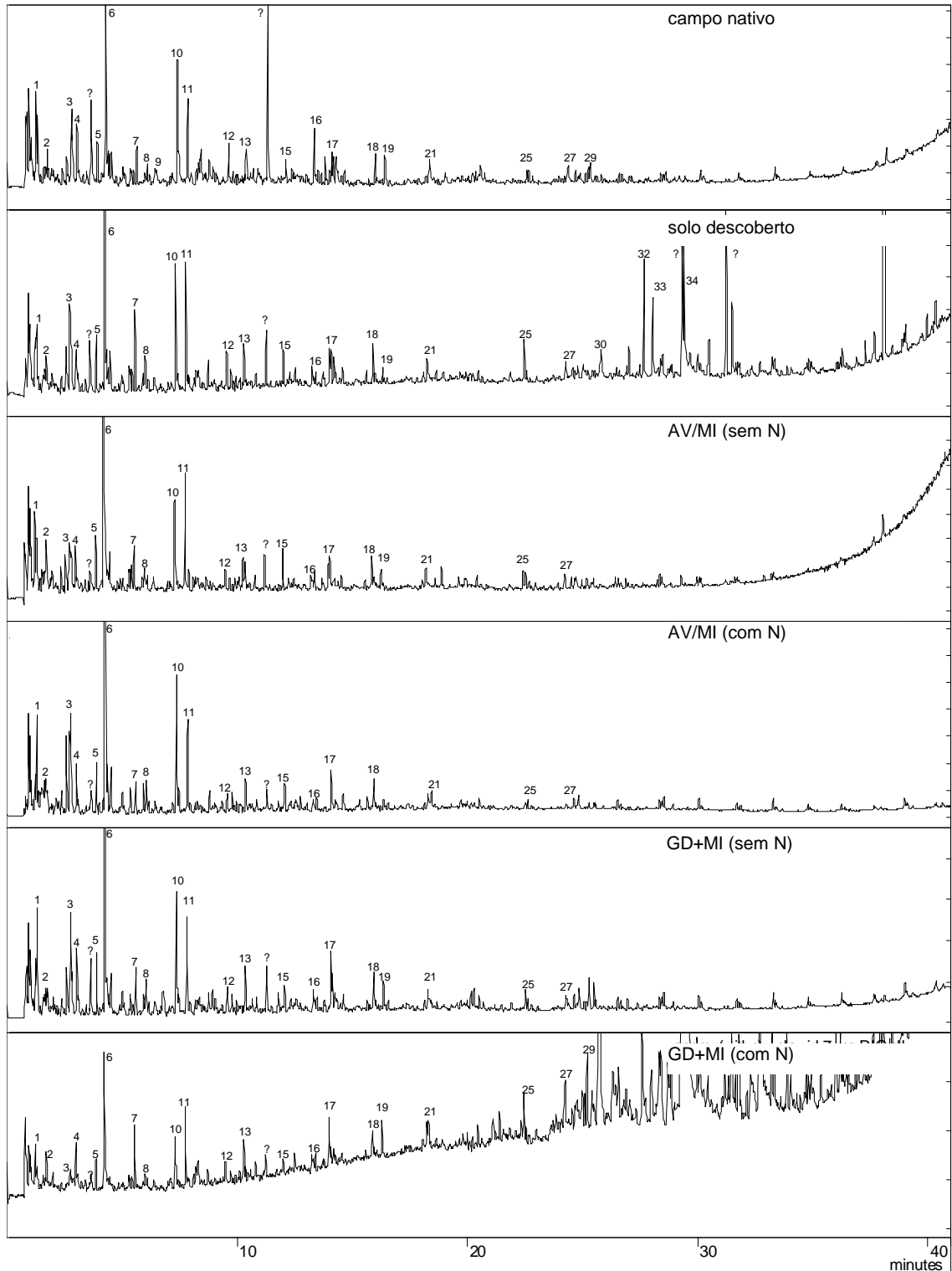


Figura 6.12. Pirogramas da fração argila da camada de 0-2,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada. Dados de pirólise analítica (Py-GC/MS). Os possíveis compostos (fragmentos de pirólise) que os picos enumerados representam estão listados na Tabela 6.6 e os respectivos espectros de massa no Apêndice 25.

intensos ao redor dos 30 minutos. Destes picos, os de n.º 33 e 34 correspondem a materiais alifáticos de cadeia longa (Tabela 6.6), enquanto que o pico 32 corresponde ao ftalato, provavelmente um contaminante. Nas demais regiões deste pirograma o padrão de distribuição e intensidade dos picos se assemelha ao dos demais sistemas. Quanto ao pirograma do sistema GD+MI (sem N), este ficou parcialmente comprometido em função da elevação da linha-base, causada pela presença de um pico de fragmento desconhecido (provavelmente algum outro contaminante que entrou no processo) na altura dos 29 a 30 minutos.

Quanto aos dados de relação C:N (Tabela 5.4, Estudo II), esses também indicam não haver diferença na qualidade da matéria orgânica da fração argila entre os sistemas de culturas sob plantio direto, e nem entre esses e o campo nativo.

Com relação a qualidade da matéria orgânica da fração argila da camada de 2,5-7,5 cm (Figura 6.7d), esta se manteve similar à observada na camada superficial (Figura 6.2d), conforme os dados de espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C. Com isso, também foi mantida a tendência de similaridade composicional entre os sistemas de culturas, bem como a tendência de maior proporção de C alquil e menor de C aromático no campo nativo (Figura 6.7d).

De todas essas informações é possível concluir que apesar de diferenças na quantidade de resíduos adicionada anualmente ao solo através dos sistemas de culturas, como 0,66 Mg C ha<sup>-1</sup>, 4,37 Mg ha<sup>-1</sup> e 8,89 Mg C ha<sup>-1</sup> nos sistemas solo descoberto, AV/MI (sem N), GD+MI (sem N), respectivamente (Bayer, 1996), e também apesar de diferenças na qualidade desses (ex. com plantas de guandu apresentando maiores proporções de C alquil, plantas de aveia com menor proporção de aromáticos etc.), os sistemas de cultura não influíram na qualidade da matéria orgânica da fração argila. Isso também confirma os resultados de Oades et al. (1988) e Golchin et al. (1995), que também não evidenciam diferenças na composição da fração argila. Os autores sugerem que a qualidade da matéria orgânica nas frações de menor tamanho orgânica é definida pelas características dos produtos de origem microbiana e não pela natureza e quantidade de resíduos vegetais adicionados ao solo. Relacionando a composição da parte aérea de plantas com a composição da MOP e com a composição de ácidos húmicos, Pillon (2000)

também concluiu não haver influência da vegetação sobre a composição da porção mais humificada da matéria orgânica, embora exista uma influência sobre a composição da MOP. Através do emprego de espectroscopia EPR em diferentes frações físicas, Bayer (1996) também constatou que as variações na concentração de radicais livres semiquinona entre sistemas de culturas foram maiores nas frações silte e areia em relação a fração argila, onde as diferenças foram mínimas.

Considerando que são os microrganismos que definem a qualidade da matéria orgânica da fração argila e de que não houve diferenças nesta entre os sistemas de culturas, é possível inferir que a comunidade microbiana, e conseqüentemente a composição de seus produtos (mucilagens, metabólitos exudatos e resíduos celulares), também tenham sido relativamente semelhantes entre os sistemas de culturas avaliados neste estudo.

Por outro lado, considerando a tendência de menor proporção de C alquil na fração argila dos sistemas de culturas sob plantio direto (sem N) em relação ao campo nativo (Figura 6.2d, 6.7d), poderia se inferir que ocorreram alterações na composição da comunidade microbiana e conseqüentemente de seus produtos, induzidas pelo cultivo do solo. Nesse caso, supõe-se que a comunidade microbiana do campo nativo estaria representada por microrganismos com maior capacidade de produção de compostos alifáticos (C alquil) em relação a comunidade presente nos sistemas de culturas. Baldock et al. (1990) observaram que culturas bacterianas continham maior proporção de C alquil que as fúngicas. Disso poderia se inferir que no campo nativo a proporção de biomassa bactéria / fungo seja mais elevada que no solo dos sistemas de culturas. Entretanto isso é uma inferência, de maneira que somente uma avaliação da microbiota poderia trazer uma informação mais concreta sobre isso e talvez clarear melhor a relação entre manejo do solo – comunidade microbiana – qualidade da matéria orgânica.

O campo nativo é um sistema estável, com uma comunidade microbiana adaptada as condições ambientais. Porém, durante o período de cultivo intenso do solo (1969-83) e mesmo durante o período experimental (1983-2000), as condições originais do solo foram alteradas e possivelmente o mesmo ocorreu com a comunidade microbiana. Schmitz (2003) relata que a atividade enzimática no campo nativo foi maior em relação a do solo dos

sistemas de culturas, o que pode ser um indicativo da existência de distintas comunidades microbianas entre os dois sistemas de uso do solo. Diferenças marcantes na composição da comunidade microbiana entre solos de campo nativo e cultivados também foram observadas por Steenwerth et al., (2003), porém entre os solos cultivados a composição foi similar.

Na camada de 37,5-47,5 cm do subsolo, a composição da matéria orgânica da fração argila (Figura 6.9d) também foi muito similar à observada para as duas camadas superficiais (Figura 6.2d, 6.7d). Entre os sistemas de culturas verificou-se uma tendência do solo descoberto e GD+MI (sem N) apresentarem menores proporções de C O-alquil e maiores de C aromático e C carbonílico (Figuras 6.9d, 6.10d). A princípio não se verifica muita lógica nesse resultado, o que pode estar vinculado a algum erro experimental durante o processo metodológico. No entanto para os sistemas campo nativo, AV/MI (sem N e com N) e GD+MI (sem N), as proporções dos diferentes tipos de C foram muito similares (Figuras 6.9d, 6.10d).

### **6.3.3. Influência da adubação nitrogenada sobre a qualidade da matéria orgânica**

A composição da matéria orgânica do solo integral (Figuras 6.2a, 6.7a), da MOP (Figuras 6.2b, 6.7b) e da fração silte (Figuras 6.2c, 6.7c) das duas camadas superficiais não foi alterada pela adubação nitrogenada, segundo os dados de RMN-<sup>13</sup>C. Pelos dados de RMN-<sup>15</sup>N (Figura 6.3), hidrólise ácida (Tabela 6.5) e pirólise analítica (Figuras 6.5, 6.6., 6.12) também não houve diferenças entre os tratamentos sem N e com N nas amostras analisadas. Entretanto, ocorreu uma certa tendência de na fração argila a proporção de C alquil ser maior nos tratamentos com aplicação de N, tanto no sistema GD+MI como para o AV/MI (Figura 6.2d, 6.7d). Uma hipótese para explicar tal resultado é que a adubação nitrogenada estaria promovendo um incremento na população bacteriana, como observado por Vargas (2002) num trabalho realizado no mesmo experimento, e assim a quantidade de produtos microbianos alifáticos (C alquil) (Baldock et al., 1990).

Maior proporção de estruturas C-H alifáticas no solo adubado com NPK também foi encontrada por Capriel (1997), através de espectroscopia infravermelho (DRIFT). Por outro lado, nenhuma alteração na qualidade da

matéria orgânica, tanto do solo integral como das frações areia, silte e argila foram observadas por Randal et al. (1995), através do emprego de espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C, em função da aplicação de fertilizante orgânico ou mineral.

#### **6.3.4. Variações na qualidade da matéria orgânica entre as frações físicas**

A composição da matéria orgânica variou consideravelmente entre a parte aérea de plantas e as três frações físicas, considerando-se a média das duas camadas superficiais e de todos os tratamentos avaliados (Figura 6.13). A maior proporção de C O-alquil, C aromático e C alquil ocorreu na parte aérea de plantas, na fração silte e na fração argila, respectivamente, estando de acordo com o modelo de decomposição do resíduo vegetal proposto por Baldock et al. (1992). A proporção de C O-alquil reduziu de 73% na parte aérea de plantas para 56%, 44% e 47% nas frações MOP, silte e argila, respectivamente. Por outro lado, a proporção de C alquil aumentou de 11% na parte aérea de plantas para 18% na MOP, 23% na fração silte e 27% na fração argila. Quanto a proporção de C aromático, essa aumentou de 10% na planta para 16% na MOP e 19% na fração silte, diminuindo novamente para 12% na fração argila. A proporção de C carbonila seguiu uma tendência aproximadamente similar à do C alquil, com incremento a partir do material de planta para a fração MOP e silte, estabilizando na fração argila.

Devido a sua maior labilidade, os carboidratos (C O-alquil) são os primeiros compostos a serem atacados no processo de decomposição. Nesse processo a MOP é fragmentada e transferida para a fração silte, onde permanece como material particulado ou já associado com minerais. Em função da decomposição mais rápida dos carboidratos (C O-alquil), a fração silte tende a possuir maior proporção de C aromático, C alquil e C carbonila em relação a MOP. Num estágio mais avançado, o material aromático também é decomposto, de forma que na fração argila a proporção de C alquil tende a aumentar.

A ocorrência de maiores proporções de C alquil na fração argila é devida a dois processos básicos (Baldock et al., 1992): i) preservação seletiva de compostos alifáticos de origem vegetal, como estruturas de cutina e suberina, e ii) síntese de compostos alifáticos *in situ* pela comunidade

microbiana. Essa formação de compostos com C alquil pode ocorrer a partir do ataque microbiano tanto sobre carboidratos (Baldock et al., 1990) como sobre material aromático (Baldock et al., 1992).

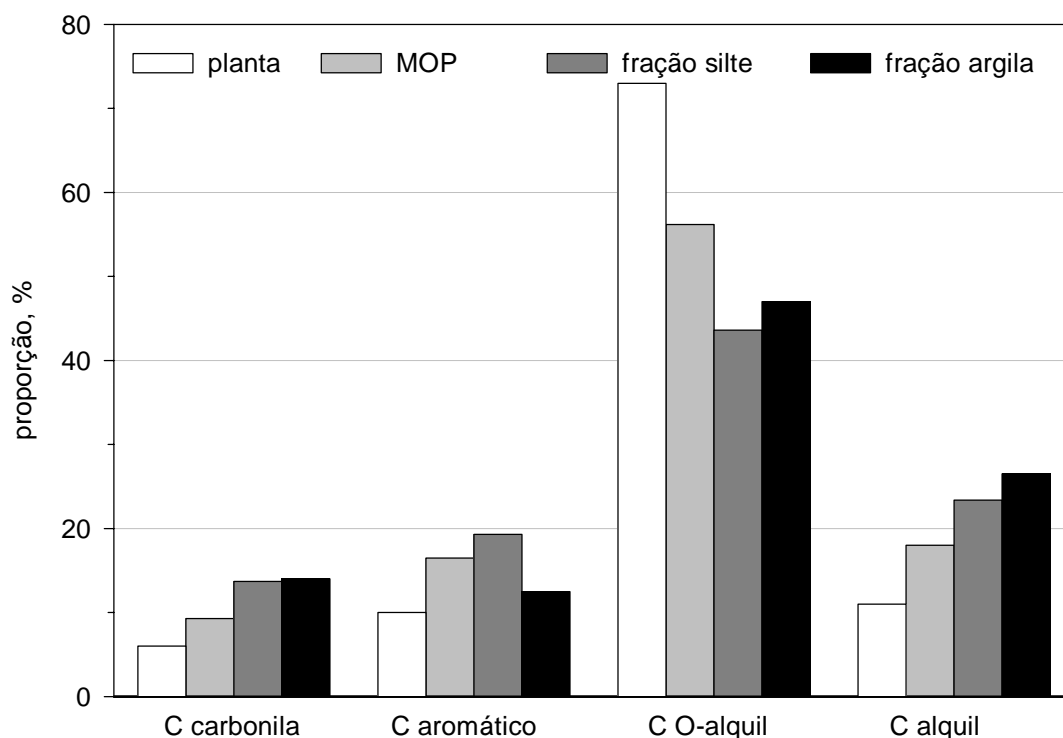


Figura 6.13. Proporção média dos diferentes tipos de C na parte aérea de plantas e nas frações físicas das duas camadas superficiais de solo de todos os tratamentos. Dados obtidos por RMN- $C^{13}$  CPMAS.

A formação de uma estrutura semelhante a uma dupla-membrana, constituída de moléculas anfifílicas (Wershaw, 1999), cujas cadeias alifáticas apolares (C alquil) estão voltadas para dentro da membrana e as porções polares para fora, interagindo com as superfícies minerais, também pode explicar a elevada proporção de C alquil na fração argila. A formação dessa dupla-membrana e sua interação seria um mecanismo de proteção da matéria orgânica (Cornejo & Hermosin, 1996).

Comparando-se com os trabalhos de Oades et al. (1987) e Baldock et al. (1992), a proporção de C O-alquil da fração argila obtida neste estudo foi significativamente maior. Em vários casos esses autores obtiveram maior proporção de C alquil do que C O-alquil na fração argila, o que talvez esteja relacionada com diferenças no tipo de solo investigado. No caso do presente

estudo, a elevada proporção de C O-alkil na fração argila é atribuída à deposição de carboidratos de origem microbiana, como quitina (polímeros de *N*-acetilglucosamina) e peptidoglicanos (polímeros de *N*-acetil glucosamina e *N*-acetil ácido murâmico) de parede celular de fungos e bactérias, respectivamente (Paul & Clark, 1996). Exudatos radiculares também podem ser responsáveis pelo acúmulo de C O-alkil na fração argila.

Através de processos hidrolíticos, Guggenberger et al. (1994) também encontraram concentrações elevadas de carboidratos (não-celulósicos) na fração argila, superiores inclusive ao das frações silte e areia. Em função da maior relação (galactose+manose)/(arabinose+xilose) na fração argila, os carboidratos dessa também são referidos pelos autores como sendo principalmente de origem microbiana, considerando que os microrganismos possuem baixa capacidade de produção de pentoses (arabinose e xilose) em comparação com as plantas.

Com relação aos dados de pirólise analítica (Figura 6.6, 6.12), observa-se que os picos 14, 20, 21 e 22, derivados de material fenólico/aromático (Tabela 6.6), 9 e 24, derivados de material protéico e 31, 33, 34 e 35, derivados de compostos alifáticos de cadeias longas, são mais intensos na MOP (Figura 6.6) que na fração argila (Figura 6.12). A maior intensidade dos picos de material aromático nos pirogramas da MOP em relação aos da fração argila é coerente com os dados de C aromático obtidos por RMN-<sup>13</sup>C (Figura 6.13). Além disso, concordam com os resultados de Saiz-Jimenez et al. (1996), onde num solo de pastagem com gramíneas os picos derivados de lignina foram mais intensos nos pirogramas das frações tamanho areia e silte do que no da fração argila. Entretanto, a maior intensidade dos picos de material alifático de cadeia longa na MOP em relação a fração argila contradiz o resultado de RMN-<sup>13</sup>C (Figura 6.13), pois a proporção de C alkil foi menor na MOP em relação a fração argila. Disso resulta o questionamento se na pirólise da fração argila não estaria ocorrendo uma influência da interação organo-mineral, ou até mesmo da microagregação, em dificultar a liberação e a volatilização dos fragmentos derivados de compostos alifáticos de cadeia longa.

#### 6.4. Conclusões

A qualidade da matéria orgânica particulada é influenciada pelas espécies vegetais que constituem os sistemas de culturas, pois essa fração é composta principalmente por resíduos de planta.

A qualidade da matéria orgânica das frações silte e argila não é afetada pela quantidade e qualidade dos resíduos vegetais adicionados ao solo pelos sistema de culturas.

A qualidade da matéria orgânica do solo integral, da matéria orgânica particulada e da fração silte não é afetada pela adubação nitrogenada. Porém, essa pode aumentar a proporção de estruturas alifáticas de cadeia longa na fração argila, supostamente por favorecer a comunidade bacteriana do solo.

A recalcitrância molecular é um mecanismo secundário de estabilização da matéria orgânica do solo. Nesse sentido, a proteção coloidal e a proteção física devem ser preponderantes na estabilização da matéria orgânica do solo em plantio direto.

O solo pode conter material carbonizado (carvão), derivado da queima da vegetação. No solo estudado, a ocorrência de carvão foi mais perceptível na fração silte da camada subsuperficial de 37,5-47,5 cm.

Os resultados analíticos das técnicas de espectroscopia RMN-<sup>13</sup>C, espectroscopia RMN-<sup>15</sup>N, hidrólise ácida e pirólise analítica são de maneira geral coerentes na avaliação da qualidade da matéria orgânica do solo.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade do solo e por conseguinte a sustentabilidade do sistema de produção agrícola depende do manejo adequado do solo. Nessa relação, a matéria orgânica é um componente intermediário essencial, de modo que os sistemas de manejo devem também contemplar o incremento de seu estoque no solo. A adoção de sistemas de preparo conservacionista, como o plantio direto, que atualmente ocupa uma área de 20 milhões de hectares no Brasil, é uma forma de promover tal incremento, mas somente quando associado com sistemas de culturas de elevada adição de resíduos e com planos adequados de adubação que permitam maior produção de fitomassa.

Espécies leguminosas de ciclo estival (ex., guandu e lablab), quando incluídas como plantas de cobertura nos sistemas de culturas, promovem significativos aumentos nos estoques de matéria orgânica, inclusive em camadas do subsolo (abaixo de 20 cm de profundidade), o que além de melhorar a qualidade do solo, também promove a qualidade ambiental, por mitigar o processo de aquecimento global através do seqüestro de C-CO<sub>2</sub> atmosférico. Entretanto, em termos práticos ainda é necessário o desenvolvimento de técnicas de manejo que permitam o uso dessas espécies em cultivos mecanizados e também o desenvolvimento de um sistema de produção de sementes, pois esses são os principais entraves para a expansão do cultivo de tais plantas.

O incremento no estoque de matéria orgânica do solo promovido por sistemas de culturas com leguminosas estivais é refletido também nas frações físicas. Vale destacar o significativo incremento no estoque de matéria orgânica particulada, o que confere a esses sistemas de culturas um maior índice de manejo de carbono (IMC), refletindo a capacidade dos mesmos em promover a sustentabilidade do sistema de produção. É importante considerar que elevada

proporção de matéria orgânica particulada, embora isso represente menor recalcitrância, é um indicativo que resíduos estão sendo adicionados em quantidades satisfatórias e que o solo está sendo capaz de protegê-los fisicamente em macroagregados. A matéria orgânica particulada é a fração física capaz de estocar uma quantidade ilimitada de matéria orgânica, desde que as adições permitam isso, ao passo que a fração de tamanho argila possui uma capacidade finita de estoque, dada pela saturação dos grupos funcionais das superfícies minerais.

Entre as frações físicas, a matéria orgânica particulada também é aquela que tem sua qualidade afetada pelas espécies vegetais que constituem os sistemas de culturas, visto que ela é constituída basicamente por resíduos de plantas. A qualidade da matéria orgânica das demais frações físicas, especialmente da fração argila, por ser determinada basicamente pela composição da comunidade microbiana e seus respectivos produtos, independe da qualidade e da quantidade dos resíduos vegetais adicionados ao solo pelos sistemas de culturas. A adubação nitrogenada também não afeta significativamente a qualidade da matéria orgânica do solo e de suas frações físicas, embora afete os estoques totais dessas frações.

Em todas as frações físicas, o principal constituinte da matéria orgânica são os carboidratos, inclusive na fração argila. Isso, associado com o fato de serem compostos facilmente decomponíveis, demonstra que a recalcitrância molecular não é o principal mecanismo de estabilização da matéria orgânica. Nesse caso, considera-se a proteção física e coloidal como os mecanismos de proteção mais importantes. Mas também existem formas aromáticas de C com significativa recalcitrância, como material carbonizado derivado da queima da vegetação. Porém acredita-se que isso representa uma proporção muito pequena do estoque total de matéria orgânica.

Por fim, vale considerar que muito dos resultados obtidos nos estudos da qualidade da matéria orgânica do solo estão condicionados ao método empregado. A pirólise analítica fornece informações mais detalhadas a nível de composto, enquanto que a espectroscopia de RMN-<sup>13</sup>C e de RMN-<sup>15</sup>N e hidrólise ácida fornece informações sobre grupos de compostos, de maneira que isso deve ser levado em consideração na interpretação dos resultados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADO, T.J.C. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e preparo do solo**. Porto Alegre, 1997. 201 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.189-197, 2001.
- BALDOCK, J.A.; NELSON, P.N. Soil organic matter. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.B25-B84.
- 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.; OADES, J.M.; VASSALLO, A.M.; WILSON, M.A. Solid-state CP/MAS  $^{13}\text{C}$  N.M.R. analysis of bacterial and fungal cultures isolated from a soil incubated with glucose. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.28, p.213-225, 1990.
- 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**, Dordrecht, v.16, p.1-42, 1992.
- BALESDENT, J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.47, p.485-493, 1996.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.28, p.1261-1263, 1996.

- BALESDENT, J.; PÉTRAUD, J.P.; FELLER, C. Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques de sols. **Science du Solo**, Paris, v.29, p.95-106, 1991.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. Porto Alegre, 1996. 241 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.95-104, 2000a.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.101-109, 2000b.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C.N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.1473-1478, 2001.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P.R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on subtropical soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.238, p.133-140, 2002a.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S.C.; MILORI, D.M.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, 2002b.
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v.46, p.1459-1460, 1995.
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GIROUX, M.; LAVERDIÈRE, M.R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v.215, p.85-91, 1999.
- BREMNER, J.M. Organic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soils analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties**. Madison: ASA, 1965. p.1238-1255.
- BURDON, J. Are the traditional concepts of the structure of humic substances realistic? **Soil Science**, Hagerstown, v.166, p.752-769, 2001.

- BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effects of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.190, p.309-316, 1997.
- CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; WILDNER, L.P.; COSTA, M.B.B.; ALCANTARA, P.B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T.J.C. **Adução verde no Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1992. 346p.
- CAMARGO, F.A.de O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Comparative study of five hydrolitic methods in the determination of soil organic nitrogen. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, Monticello, v.28, p.1303-1309, 1997.
- CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; RHEINHEIMER, D.; KAMINSKI, J.; BISSANI, C.A. Fracionamento do N, P e S orgânicos. In: SANTOS G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.359-388.
- CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.777-783, 1992.
- CAMPBELL, C.A.; BIEDERBECK, V.O.; ZENTNER, R.P.; LAFOND, G.P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.71, p.363-376, 1991a.
- CAMPBELL, C.A.; BOWREN, K.E.; SCHNITZER, M.; ZENTNER, R.P.; TOWNLEY-SMITH, L. Effect of crop rotation and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.71, p.377-387, 1991b.
- CAMPBELL, C.A.; McCONKEY, B.G.; ZENTNER, R.P.; SELLES, F.; CURTIN, D. Long-term effects of tillage and crop rotations on soil organic C and total N in a clay soil in Southwestern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.76, p.395-401, 1996.
- CAPRIEL, P. Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.48, p.457-462, 1997.
- CAPRIEL, P.; HÄRTER, P.; STEPHENSON, D. Influence of management on the organic matter of a mineral soil. **Soil Science**, Hagerstown, v.153, p.122-128, 1992.
- CERETTA, C.A. **Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistemas de cultura sob plantio direto**. Porto Alegre, 1995. 127 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

- CERETTA, C.A.; BAYER, C.; DICK, D.P.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L.A. Métodos espectroscópicos. In: SANTOS G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.293-336.
- CERRI, C.C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo no agroecossistema cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1986. 197 f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.
- CHEFETZ, B.; TARCHITZKY, J.; DESHMUKH, A.P.; HATCHER, P.; CHEN, Y. Structural characterization of soil organic matter and humic acids in particle-size fractions of an agricultural soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.129-141, 2002.
- 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. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p.97-165.
- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.52, p.345-353, 2001.
- CORNEJO, J.; HERMOSÍN, M.C. Interaction of humic substances in soil clays. In: PICCOLO, A. (Ed.). **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.595-624.
- DALAL, R.C. Long-term effects of no-tillage, crop residue, and nitrogen application on properties of a Vertisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.1511-1515, 1989.
- DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. II Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.24, p.281-292, 1986.
- DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. VI Loss of total nitrogen from different particle-size and density fractions. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.25, p.83-93, 1987.
- DING, G.; NOVAK, J.M.; AMARASIRIWARDEMA, D.; HUNT, P.G.; XING, B. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.421-429, 2002.

- EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.18, p.64-73, 1967.
- ELLERBROCK, R.H.; HÖHN, A.; GERKE, H.H. Characterization of soil organic matter from a sandy soil in relation to management practice using FT-IR spectroscopy. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.213, p.55-61, 1999.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- ESAU, K. **Anatomia da plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 283 p.
- FALKNER, E.H. **La insensatez del labrador**. Buenos Aires: El Ateneo, 1945. 243 p.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.69-116, 1997.
- FORD, G.W.; GREENLAND, D.J.; OADES, J.M. Separation of the light fraction from soils by ultrasonic dispersion in halogenated hydrocarbons containing a surfactant. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.20, p.291-296, 1969.
- FREIXO, A.A.; MACHADO, P.L.O.de; SANTOS, H.P.dos; SILVA, C.A.; FADIGAS, F.deS. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsols under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.64, p.221-230, 2002.
- FRÜND, R.; HAIDER, K.; LÜDEMANN, H.-D. Impacts of soil management practices on the organic matter structure – Investigations by CPMAS <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Weinheim, v.157, p.29-35, 1994.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis – Part 1 Physical and mineralogical methods**. Madison: SSSA, 1986. p.383-411.
- GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soil by solid state <sup>13</sup>C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.32, p.285-309, 1994.
- GOLCHIN, A.; CLARKE, P.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.33, p.975-993, 1995.
- GOLCHIN, A.; BALDOCK, J.A.; OADES, J.M. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.245-266.

- GONÇALVES, C.N.; DALMOLIN, R.S.D.; DICK, D.P.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KÖGEL-KNABNER, I. The effect of 10% HF treatment on the resolution of CPMAS  $^{13}\text{C}$  spectra and on the quality of organic matter in Ferralsols. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, p.373-392, 2003.
- GONZÁLEZ-VILA, F.J.; ALMENDROS, G.; TINOCO, P.; RODRÍGUEZ, J. Nitrogen speciation and pyrolytic patterns of  $^{15}\text{N}$ -labelled soil and compost fractions. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, Amsterdam, v.58/59, p.329-339, 2001.
- GREENLAND, D.J. Interaction between clays and organic compounds in soil. Part I. Mechanisms of interaction between clays and defined organic compounds. **Soil and Fertilizers**, Oxon, v.28, p.415-425, 1965a.
- GREENLAND, D.J. Interaction between clays and organic compounds in soil. Part II. Adsorption of soil organic compounds and its effects on soil properties. **Soil and Fertilizers**, Oxon, v.28, p.521-532, 1965b.
- GREGORICH, E.G.; JANZEN, H.H. Storage and soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p.97-165.
- GREGORICH, E.G.; ELLERT, B.H.; DRURY, C.F.; LIANG, B.C. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residue C storage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.472-476, 1996.
- GUGGENBERGER, G.; CHRISTENSEN, B.T.; ZECH, W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.45, p.449-458, 1994.
- GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; HAUMAIER, L.; CHRISTENSEN, B.T. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: II. CPMAS and solution  $^{13}\text{C}$  NMR analysis. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, p.147-158, 1995.
- 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.
- HASSINK, J.; WHITMORE, A.P. A model of the physical protection of organic matter in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.131-139, 1997.
- HATCHER, P.G.; DRIA, K.J.; KIM, S.; FRAZIER, S.W. Modern analytical studies of humic substances. **Soil Science**, Hagerstown, v.166, p.770-794, 2001.



- HAYES, M.H.B.; CLAPP, C.E. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure and environmental influences. **Soil Science**, Hagerstown, v.166, p.723-737, 2001.
- HÉNIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, Paris, v.15, p.17-29, 1945.
- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; BRANDT, S.A.; LAFOND, G.P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.1799-1806, 1992.
- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; GREGORICH, E.G.; ELLERT, B.H. Soil carbon dynamics in canadian agroecosystems. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p.57-80.
- JASTROW, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.28, p.665-676, 1996.
- JOHNSTON, A.E. The Rothamsted classical experiments. In: LEIGH, R.A.; JOHNSTON, A.E. (Eds.). **Long-term experiments in agricultural and ecological science**. Oxon: CAB International, 1994. p.9-37.
- KINCESH, P.; POWLSON, D.S.; RANDAL, E.W.  $^{13}\text{C}$  NMR studies of organic matter in whole soils: I. quantitation possibilities. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, p.125-138, 1995.
- KNICKER, H. Biogenic nitrogen in soil as revealed by solid-state carbon-13 and nitrogen-15 nuclear magnetic resonance spectroscopy. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, p.715-723, 2000.
- KNICKER, H.; LÜDEMANN, H.-D. N-15 and C-13 CPMAS and solution NMR studies of N-15 enriched plant material during 600 days of microbial degradation. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.28, p.329-341, 1995.
- KNICKER, H.; HATCHER, P.G. Survival of protein in an organic-rich sediment: Possible protection by encapsulation in organic matter. **Naturwissenschaften**, Berlin, v.84, p.231-234, 1997.
- KNICKER, H.; SKJEMSTAD, J.O. Nature of organic carbon and nitrogen in physically protected organic matter of some Australian soils as revealed by solid-state  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  NMR spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.38, p.113-127, 2000.
- KNICKER, H.; FRÜND, R.; LÜDEMANN, H.-D. The chemical nature of nitrogen in native soil organic matter. **Naturwissenschaften**, Berlin, v.80, p.219-221, 1993.

- KNICKER, H.; SAGGAR, S.; BÄUMLER, R.; McINTOSH, P.D.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic matter transformations induced by *Hieracium Pilosella* L. in tussock grassland of New Zealand. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.32, p.194-201, 2000a.
- KNICKER, H.; SCHMIDT, M.W.I.; KÖGEL-KNABNER, I. Nature of organic nitrogen in fine particle size separates of sandy soils of highly industrialized areas as revealed by NMR spectroscopy. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v.32, p.241-252, 2000b.
- KÖGEL-KNABNER, I.  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  NMR spectroscopy as tool in soil organic matter studies. **Geoderma**, Amsterdam, v.80, p.243-270, 1997.
- KÖGEL-KNABNER, I. Analytical approaches for characterizing soil organic matter. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.31, p.609-625, 2000.
- KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.34, p.139-162, 2002.
- KONONOVA, M.M. **Soil organic matter: Its nature, its role in soil formation and in its fertility**. London: Pergamon Press, 1966. 544p. Cap. 1: The main stages in the history of soil humus study.
- LASSUS, C. Composição dos resíduos vegetais em um solo manejado com nove sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p.375-380, 1990.
- LEINWEBER, P.; SCHULTEN, H.-R. Advances in analytical pyrolysis of soil organic matter. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, Amsterdam, v.49, p.359-383, 1999.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A.; GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolos sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.821-832, 2003.
- LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. Porto Alegre, 2001. 133 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- MARTIN-NETO, L.; ANDRIULO, A.E.; TRAGHETTA, D.G. Effects of cultivation on ESR spectra of organic matter from soil size fractions of a Mollisol. **Soil Science**, Hagerstown, v.157, p.365-372, 1994.
- MEDEIROS, J.C. **Sistemas de cultura adaptados a produtividade, recuperação e conservação do solo**. Porto Alegre, 1985. 89 f. Dissertação

- (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.
- MENDHAM, D.S.; MATHERS, N.J.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; SAFFIGNA, P.G. Impact of land-use on soil organic matter quality in south-western Australia – characterization with  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR spectroscopy. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.34, p.1669-1676, 2002.
- MIELNICZUK, J. Conservação do solo. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, n.66, p.17-21, 1983.
- MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: Uma síntese histórica. **Revista da Agronomia**, Porto Alegre, v.12, p.11-22, 1999.
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURTI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V.H. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo 3**. Viçosa: SBCS, 2003. p.209-241.
- MIKHAILOVA, E.A.; BRYANT, R.B.; VASSENEV, I.I.; SCHWAGER, S.J.; POST, C.J. Cultivation Effects on soil carbon and nitrogen contents at depth in Russian Chernozem. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.738-745, 2000.
- MILORI, D.M.B.P.; MARTIN-NETO, L.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; BAGNATO, V.S. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Hagerstown, v.167, p.739-749, 2002.
- MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo**. 2.ed. Chapecó: Ed. do autor, 1991. 337 p.
- MOOJEN, E.L. **Dinâmica e potencial produtivo de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul submetida a pressões de pastejo, épocas de diferimento e níveis de adubação**. Porto Alegre, 1991. 172 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- NEUFELDT, H.; RESCK, D.V.S.; AYARZA, M.A. Texture and land-use effects on soil organic matter in Cerrado Oxisols, Central Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.107, p.151-164, 2002.
- NIEROP, K.G.J.; van LAGEN, B.; BUURMAN, P. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession. **Geoderma**, Amsterdam, v.100, p.1-24, 2001.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.76, p.319-337, 1984.

- OADES, J.M.; VASSALLO, A.M.; WATERS, A.G.; WILSON, M.A. Characterization of organic matter in particle size and density fractions from a red-brown earth by solid-state  $^{13}\text{C}$  N.M.R. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.25, p.71-82, 1987.
- OADES, J.M.; WATERS, A.G.; VASSALLO, A.M.; WILSON, M.A.; JONES, G.P. Influence of management on the composition of organic matter in a red-brown earth as shown by  $^{13}\text{C}$  nuclear magnetic resonance. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.26, p.289-299, 1988.
- 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.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2.ed. San Diego: Academic Press, 1996. 340 p.
- PHILLIPS, S.H.; YOUNG JR, H.M. **No-tillage farming**. Milwaukee: Reiman Associates, 1973. 224 p.
- PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. **Soil Science**, Hagerstown, v.166, p.810-832, 2001.
- PILLON, C.N. **Alteração no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de culturas em plantio direto**. Porto Alegre, 2000. 232 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- PONOMARENKO, E.V.; ANDERSON, D.W. Importance of charred organic matter in Black Chernozem soils of Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.81, p.285-297, 2001.
- PONS, A.L.; NUSS, C.N.; PINTO, R.J.B. Efeito de doses de nitrogênio sobre o rendimento do milho, em cultivo mínimo e convencional após o cultivo da vicia. REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 29, 1984, Porto Alegre. **Ata...** Porto Alegre: Ipagro/Emater-RS, 1984. p.97-98.
- PRESTON, C.M.; NEWMAN, R.H.; ROTHER, P. Using  $^{13}\text{C}$  CPMAS NMR to assess effects of cultivation on the organic matter of particle size fractions in a grassland soil. **Soil Science**, Hagerstown, v.157, p.26-35, 1994.
- PUGET, P.; CHENU, C.; BALESSENT, J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.51, p.595-605, 2000.
- RANDAL, E.W.; MAHIEU, N.; POWLSON, D.S.; CHRISTENSEN, B.T. Fertilization effects on organic matter in physically fractionated soils as studied by  $^{13}\text{C}$  NMR: Results from two long-term field experiments. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, p.557-565, 1995.

- 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.
- RUSSEL, J.C. Organic matter problems under dry farming conditions. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v.21, p.960-969, 1929.
- SÁ, J.C.deM.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE-FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.1486-1499, 2001.
- SAIZ-JIMENEZ, C.; HERMOSIN, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: III. Analytical pyrolysis. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.47, p.61-69, 1996.
- SANCHEZ, P. **Properties and management of soils in the tropics**. New York: John Wiley, 1976. 618 p. Cap. 5: Soil organic matter.
- SCHMIDT, M.W.I.; KINICKER, H.; HATCHER, P.G.; KÖGEL-KNABNER, I. Improvement of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  CPMAS NMR spectra of bulk soils, particle size fractions and organic material by treatment with 10% hydrofluoric acid. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.48, p.319-328, 1997.
- SCHMIDT, M.W.I.; SKJEMSTAD, J.O.; GEHRT, E.; KÖGEL-KNABNER, I. Charred organic carbon in German Chernozemic soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.50, p.351-365, 1999.
- SCHMITZ, J.A.K. **Indicadores biológicos de qualidade do solo**. Porto Alegre, 2003. 234 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SCHULTEN, H.-R. A chemical structure for humic acid. Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and pyrolysis-soft ionization mass spectrometry evidence. In: SENESI, N.; MIANO. **Humic substances in the global environment and implications on human health**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.43-56.
- SCHULTEN, H.-R.; SCHNITZER, M. The chemistry of soil organic nitrogen: a review. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.26, p.1-15, 1998.
- SILVA, E.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.313-319, 1997.
- SILVA, J.E.da; 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.541-547, 1994.
- 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**, Dordrecht, v.241, p.155-176, 2002.
- SKJEMSTAD, J.O.; DALAL, R.C.; BARRON, P.F. Spectroscopic investigations of cultivation effects on organic matter of Vertisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p.354-359, 1986.
- SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J.A.; OADES, J.M.; NEWMAN, R.H. The removal of magnetic materials from surface soils. A solid state  $^{13}\text{C}$  CP/MAS n.m.r. study. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.32, p.1215-1229, 1994.
- 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.251-271, 1996.
- SKJEMSTAD, J.O.; DALAL, R.C.; JANIK, L.J.; MCGOWAN, J.A. Changes in chemical nature of soil organic carbon in Vertisols under wheat in south-eastern Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.39, p.343-359, 2001.
- SKJEMSTAD, J.O.; REICOSKY, D.C.; WILTS, A.R.; MCGOWAN, J.A. Charcoal carbon in U.S agricultural soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1249-1255, 2002.
- 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.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.
- SPYCHER, G.; SOLLINS, P.; ROSE, S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: vertical distribution and seasonal patterns. **Soil Science**, Hagerstown, v.135, p.79-87, 1983.
- STEARMAN, G.K.; LEWIS, R.J.; TORTORELLI, L.J.; TYLER, D.D. Characterization of humic acid from no-tilled and tilled soils using carbon-13 nuclear magnetic resonance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.744-749, 1989.
- STEENWERTH, K.L.; JACKSON, L.E.; CALDERÓN, F.J.; STROMBERG, M.R.; SCOW, K.M. Soil microbial community composition and land history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.35, p.489-500, 2003.

- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition and reactions**. 2.ed. New York: John Wiley, 1994. 496 p.
- STEVENSON, F.J. Nitrogen – Organic forms. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAIA, M.A. JOHNSTON, C.T.; SUMNER, M.E. (Eds.). **Methods of Soil Analysis – Part 3 Chemical methods**. Madison: SSSA, 1996. p.1185-1200.
- STEVENSON, F.J.; ELLIOTT, E.T. Methodologies for assessing the quantity and quality of soil organic matter. In: COLEMAN, D.; OADES, J.M.; UEHARA, G. (Eds.). **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: Niftal Project, 1989. p.173-199.
- SWIFT, R.S. Sequestration of carbon by soil. **Soil Science**, Hagerstown, v.166, p.858-871, 2001.
- TEIXEIRA, L.A.J. **Fornecimento de nitrogênio ao milho por sistemas de cultura**. Porto Alegre, 1988. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- TESTA, V.M. **Características químicas de um solo Podzólico Vermelho Escuro, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas**. Porto Alegre, 1989. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.
- TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, p.509-514, 1983.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil Fertility and Fertilizers**. 5.ed. New York: McMillan, 1993. 634 p.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, Hagerstown, v.33, p.141-163, 1982.
- TURCHENEK, L.W.; OADES, J.M. Fractionation of organo-mineral complexes by sedimentation and density techniques. **Geoderma**, Amsterdam, v.21, p.311-343, 1979.
- VARGAS, L.K. **Composição da comunidade microbiana do solo e sua relação com a disponibilidade de nitrogênio para a cultura do milho**. Porto Alegre, 2002. 103 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. Porto Alegre, 2001. 184 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em

Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

WATSON, J.R. Ultrasonic vibration as a method of soil dispersion. **Soil and Fertilizers**, Oxon, v.34, p.127-134, 1971.

WERSHAW, R. Molecular aggregation of humic substances. **Soil Science**, Hagerstown, v.164, p.803-813, 1989.

WILSON, M.A. **N.M.R. techniques and applications in geochemistry and soil chemistry**. Oxford: Pergamon Press, 1987. 353 p.

WOODRUFF, C.M. Estimating the nitrogen delivery of soil from the organic matter determination as reflected by Sanborn field. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.14, p.208-212, 1949.

ZANG, X.; HEEMST, J.D.H. van; DRIA, K.J.; HATCHER, P.G. Encapsulation of protein in humic acid from a histosol as an explanation for the occurrence of organic nitrogen in soil and sediment. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.31, p.679-695, 2000.



## **9. APÊNDICES**

Apêndice 1. Dados originais de concentração de C e N ( $\text{g kg}^{-1}$ ), relação C:N e densidade do solo de cada camada de cada tratamento.

tratamento	camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo <sup>1/</sup> Mg m <sup>-3</sup>
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
	-- cm --	----- g kg <sup>-1</sup> de solo -----												
campo nativo	0-2,5	23,06	20,13	22,77	<b>21,99</b>	1,98	1,48	1,78	<b>1,75</b>	11,6	13,6	12,8	<b>12,7</b>	1,49
	2,5-7,5	17,08	15,15	17,59	<b>16,61</b>	1,52	1,15	1,48	<b>1,38</b>	11,2	13,2	11,9	<b>12,1</b>	1,51
	7,5-17,5	10,69	12,11	10,86	<b>11,22</b>	0,91	0,85	0,91	<b>0,89</b>	11,7	14,2	11,9	<b>12,6</b>	1,63
	17,5-27,5	9,87	11,48	10,91	<b>10,75</b>	0,79	0,81	0,85	<b>0,82</b>	12,5	14,2	12,8	<b>13,2</b>	1,62
	27,5-37,5	9,63	9,76	9,56	<b>9,65</b>	0,76	0,75	0,70	<b>0,74</b>	12,7	13,0	13,7	<b>13,1</b>	1,62
	37,5-47,5	8,30	9,45	8,56	<b>8,77</b>	0,67	0,67	0,59	<b>0,64</b>	12,4	14,1	14,5	<b>13,7</b>	1,62
	47,5-57,5	8,19	8,55	8,24	<b>8,33</b>	0,68	0,69	0,60	<b>0,66</b>	12,0	12,4	13,7	<b>12,7</b>	1,62
	57,5-67,5	6,86	8,20	7,63	<b>7,56</b>	0,62	0,67	0,58	<b>0,62</b>	11,1	12,2	13,2	<b>12,2</b>	1,62
	67,5-87,5	6,71	7,43	6,14	<b>6,76</b>	0,64	0,61	0,51	<b>0,59</b>	10,5	12,2	12,0	<b>11,6</b>	1,62
87,5-107,5	5,77	6,70	4,76	<b>5,74</b>	0,59	0,58	0,43	<b>0,53</b>	9,8	11,6	11,1	<b>10,8</b>	1,62	
solo descoberto	0-2,5	12,47	12,16	15,27	<b>13,30</b>	1,15	1,11	1,35	<b>1,20</b>	10,8	11,0	11,3	<b>11,0</b>	1,42
	2,5-7,5	8,75	8,60	9,45	<b>8,93</b>	0,83	0,83	0,86	<b>0,84</b>	10,5	10,4	11,0	<b>10,6</b>	1,58
	7,5-17,5	7,61	8,55	8,52	<b>8,23</b>	0,74	0,77	0,68	<b>0,73</b>	10,3	11,1	12,5	<b>11,3</b>	1,60
	17,5-27,5	8,04	8,79	8,96	<b>8,60</b>	0,65	0,69	0,69	<b>0,68</b>	12,4	12,7	13,0	<b>12,7</b>	1,60
	27,5-37,5	7,82	8,78	8,59	<b>8,40</b>	0,63	0,69	0,62	<b>0,65</b>	12,4	12,7	13,9	<b>13,0</b>	1,60
	37,5-47,5	7,67	7,78	7,99	<b>7,81</b>	0,62	0,61	0,60	<b>0,61</b>	12,4	12,8	13,3	<b>12,8</b>	1,60
	47,5-57,5	7,11	7,39	7,11	<b>7,20</b>	0,65	0,61	0,56	<b>0,61</b>	10,9	12,1	12,7	<b>11,9</b>	1,60
	57,5-67,5	6,50	6,44	5,96	<b>6,30</b>	0,58	0,54	0,49	<b>0,54</b>	11,2	11,9	12,2	<b>11,8</b>	1,60
	67,5-87,5	5,92	5,64	5,68	<b>5,75</b>	0,56	0,51	0,48	<b>0,52</b>	10,6	11,1	11,8	<b>11,2</b>	1,60
87,5-107,5	5,20	4,92	4,96	<b>5,03</b>	0,54	0,49	0,46	<b>0,50</b>	9,6	10,0	10,8	<b>10,2</b>	1,60	
AV/MI (sem N)	0-2,5	14,34	15,44	13,13	<b>14,30</b>	1,33	1,30	1,14	<b>1,26</b>	10,8	11,9	11,5	<b>11,4</b>	1,54
	2,5-7,5	11,39	10,38	9,06	<b>10,28</b>	1,06	0,96	0,84	<b>0,95</b>	10,7	10,8	10,8	<b>10,8</b>	1,56
	7,5-17,5	8,42	8,00	7,79	<b>8,07</b>	0,76	0,71	0,67	<b>0,71</b>	11,1	11,3	11,6	<b>11,3</b>	1,62
	17,5-27,5	8,56	8,25	8,56	<b>8,46</b>	0,72	0,67	0,69	<b>0,69</b>	11,9	12,3	12,4	<b>12,2</b>	1,59
	27,5-37,5	8,85	8,30	8,28	<b>8,48</b>	0,73	0,68	0,63	<b>0,68</b>	12,1	12,2	13,1	<b>12,5</b>	1,59
	37,5-47,5	8,75	7,42	7,50	<b>7,89</b>	0,70	0,61	0,56	<b>0,62</b>	12,5	12,2	13,4	<b>12,7</b>	1,59
	47,5-57,5	7,81	7,56	7,56	<b>7,64</b>	0,67	0,60	0,60	<b>0,62</b>	11,7	12,6	12,6	<b>12,3</b>	1,59
	57,5-67,5	6,75	6,81	6,85	<b>6,80</b>	0,62	0,56	0,52	<b>0,57</b>	10,9	12,2	13,2	<b>12,1</b>	1,59
	67,5-87,5	5,58	6,05	6,05	<b>5,89</b>	0,57	0,50	0,52	<b>0,53</b>	9,8	12,1	11,6	<b>11,2</b>	1,59
87,5-107,5	4,99	5,16	4,77	<b>4,97</b>	0,54	0,48	0,45	<b>0,49</b>	9,2	10,8	10,6	<b>10,2</b>	1,59	

continua ...

... continuação do Apêndice 1

tratamento	camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo <sup>1/</sup> Mg m <sup>-3</sup>
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
	-- cm --	----- g kg <sup>-1</sup> de solo -----												
AV/MI (com N)	0-2,5	18,93	17,17	14,27	<b>16,79</b>	1,61	1,43	1,21	<b>1,42</b>	11,8	12,0	11,8	<b>11,9</b>	1,54
	2,5-7,5	12,62	10,66	10,21	<b>11,16</b>	1,18	0,97	0,93	<b>1,03</b>	10,7	11,0	11,0	<b>10,9</b>	1,56
	7,5-17,5	8,49	8,75	8,74	<b>8,66</b>	0,81	0,77	0,75	<b>0,78</b>	10,5	11,4	11,7	<b>11,2</b>	1,62
	17,5-27,5	8,76	8,19	9,51	<b>8,82</b>	0,76	0,67	0,76	<b>0,73</b>	11,5	12,2	12,5	<b>12,1</b>	1,59
	27,5-37,5	8,29	8,36	9,15	<b>8,60</b>	0,64	0,61	0,70	<b>0,65</b>	13,0	13,7	13,1	<b>13,2</b>	1,59
	37,5-47,5	7,97	8,24	8,87	<b>8,36</b>	0,65	0,59	0,65	<b>0,63</b>	12,3	14,0	13,6	<b>13,3</b>	1,59
	47,5-57,5	7,03	7,55	8,03	<b>7,54</b>	0,61	0,62	0,60	<b>0,61</b>	11,5	12,2	13,4	<b>12,4</b>	1,59
	57,5-67,5	6,69	6,63	8,26	<b>7,19</b>	0,60	0,51	0,66	<b>0,59</b>	11,2	13,0	12,5	<b>12,2</b>	1,59
	67,5-87,5	5,46	5,55	6,40	<b>5,80</b>	0,58	0,47	0,52	<b>0,52</b>	9,4	11,8	12,3	<b>11,2</b>	1,59
87,5-107,5	4,49	5,30	5,13	<b>4,97</b>	0,51	0,49	0,43	<b>0,48</b>	8,8	10,8	11,9	<b>10,5</b>	1,59	
LB+MI (sem N)	0-2,5	32,28	24,28	32,35	<b>29,64</b>	2,97	2,13	2,79	<b>2,63</b>	10,9	11,4	11,6	<b>11,3</b>	1,55
	2,5-7,5	16,02	11,78	14,28	<b>14,03</b>	1,65	1,09	1,33	<b>1,36</b>	9,7	10,8	10,7	<b>10,4</b>	1,64
	7,5-17,5	9,98	8,73	10,13	<b>9,61</b>	0,99	0,80	0,94	<b>0,91</b>	10,1	10,9	10,8	<b>10,6</b>	1,64
	17,5-27,5	8,75	8,39	9,09	<b>8,74</b>	0,83	0,72	0,74	<b>0,76</b>	10,5	11,7	12,3	<b>11,5</b>	1,63
	27,5-37,5	8,32	8,95	9,27	<b>8,85</b>	0,75	0,65	0,66	<b>0,69</b>	11,1	13,8	14,0	<b>13,0</b>	1,63
	37,5-47,5	8,74	8,43	8,17	<b>8,45</b>	0,72	0,61	0,62	<b>0,65</b>	12,1	13,8	13,2	<b>13,0</b>	1,63
	47,5-57,5	8,22	8,30	6,99	<b>7,84</b>	0,67	0,60	0,51	<b>0,59</b>	12,3	13,8	13,7	<b>13,3</b>	1,63
	57,5-67,5	7,37	7,87	7,13	<b>7,46</b>	0,63	0,57	0,58	<b>0,59</b>	11,7	13,8	12,3	<b>12,6</b>	1,63
	67,5-87,5	5,90	5,80	5,65	<b>5,78</b>	0,55	0,45	0,48	<b>0,49</b>	10,7	12,9	11,8	<b>11,8</b>	1,63
87,5-107,5	5,01	4,61	5,11	<b>4,91</b>	0,50	0,40	0,43	<b>0,44</b>	10,0	11,5	11,9	<b>11,1</b>	1,63	
LB+MI (com N)	0-2,5	37,11	35,79	32,32	<b>35,07</b>	3,29	3,20	2,94	<b>3,14</b>	11,3	11,2	11,0	<b>11,2</b>	1,55
	2,5-7,5	17,27	16,57	15,70	<b>16,51</b>	1,58	1,58	1,52	<b>1,56</b>	10,9	10,5	10,3	<b>10,6</b>	1,64
	7,5-17,5	9,68	9,74	10,58	<b>10,00</b>	0,83	0,96	1,03	<b>0,94</b>	11,7	10,1	10,3	<b>10,7</b>	1,64
	17,5-27,5	9,33	9,17	9,49	<b>9,33</b>	0,87	0,85	0,80	<b>0,84</b>	10,7	10,8	11,9	<b>11,1</b>	1,63
	27,5-37,5	9,32	9,42	8,56	<b>9,10</b>	0,65	0,74	0,67	<b>0,69</b>	14,3	12,7	12,8	<b>13,3</b>	1,63
	37,5-47,5	8,34	9,34	8,59	<b>8,76</b>	0,66	0,72	0,67	<b>0,68</b>	12,6	13,0	12,8	<b>12,8</b>	1,63
	47,5-57,5	8,06	8,40	8,13	<b>8,20</b>	0,68	0,61	0,62	<b>0,64</b>	11,9	13,8	13,1	<b>12,9</b>	1,63
	57,5-67,5	6,80	7,84	7,82	<b>7,49</b>	0,58	0,67	0,61	<b>0,62</b>	11,7	11,7	12,8	<b>12,1</b>	1,63
	67,5-87,5	6,80	5,45	6,25	<b>6,17</b>	0,60	0,47	0,55	<b>0,54</b>	11,3	11,6	11,4	<b>11,4</b>	1,63
87,5-107,5	5,54	4,47	5,28	<b>5,10</b>	0,55	0,40	0,50	<b>0,48</b>	10,1	11,2	10,6	<b>10,6</b>	1,63	

continua ...

... continuação do Apêndice 1

tratamento	camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo <sup>1/</sup> Mg m <sup>-3</sup>
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
	-- cm --	----- g kg <sup>-1</sup>				----- de solo -----								
GD+MI (sem N)	0-2,5	38,82	32,28	26,61	<b>32,57</b>	3,01	2,66	2,15	<b>2,61</b>	12,9	12,1	12,4	<b>12,5</b>	1,44
	2,5-7,5	14,80	13,92	12,80	<b>13,84</b>	1,35	1,32	1,17	<b>1,28</b>	11,0	10,5	10,9	<b>10,8</b>	1,65
	7,5-17,5	9,56	9,03	8,99	<b>9,19</b>	0,90	0,90	0,86	<b>0,89</b>	10,6	10,0	10,5	<b>10,4</b>	1,65
	17,5-27,5	9,71	8,78	9,23	<b>9,24</b>	0,86	0,80	0,76	<b>0,81</b>	11,3	11,0	12,1	<b>11,5</b>	1,65
	27,5-37,5	9,62	9,48	9,39	<b>9,50</b>	0,79	0,78	0,71	<b>0,76</b>	12,2	12,2	13,2	<b>12,5</b>	1,65
	37,5-47,5	9,73	8,74	9,14	<b>9,20</b>	0,77	0,72	0,66	<b>0,72</b>	12,6	12,1	13,8	<b>12,9</b>	1,65
	47,5-57,5	8,00	8,71	7,96	<b>8,22</b>	0,70	0,71	0,60	<b>0,67</b>	11,4	12,3	13,3	<b>12,3</b>	1,65
	57,5-67,5	9,20	7,67	6,59	<b>7,82</b>	0,75	0,65	0,55	<b>0,65</b>	12,3	11,8	12,0	<b>12,0</b>	1,65
	67,5-87,5	6,19	6,37	7,21	<b>6,59</b>	0,56	0,58	0,63	<b>0,59</b>	11,1	11,0	11,4	<b>11,2</b>	1,65
87,5-107,5	4,70	4,88	5,43	<b>5,00</b>	0,45	0,53	0,52	<b>0,50</b>	10,4	9,2	10,4	<b>10,0</b>	1,65	
GD+MI (com N)	0-2,5	30,71	46,56	35,99	<b>37,75</b>	2,45	3,80	2,87	<b>3,04</b>	12,5	12,3	12,5	<b>12,4</b>	1,44
	2,5-7,5	14,46	19,09	17,88	<b>17,14</b>	1,30	1,72	1,60	<b>1,54</b>	11,1	11,1	11,2	<b>11,1</b>	1,65
	7,5-17,5	9,61	11,20	11,33	<b>10,71</b>	0,87	1,08	1,00	<b>0,98</b>	11,0	10,4	11,3	<b>10,9</b>	1,65
	17,5-27,5	9,73	8,66	9,22	<b>9,20</b>	0,86	0,77	0,80	<b>0,81</b>	11,3	11,2	11,5	<b>11,4</b>	1,65
	27,5-37,5	9,57	8,61	9,18	<b>9,12</b>	0,75	0,73	0,75	<b>0,74</b>	12,8	11,8	12,2	<b>12,3</b>	1,65
	37,5-47,5	9,32	8,03	8,31	<b>8,55</b>	0,72	0,67	0,64	<b>0,68</b>	12,9	12,0	13,0	<b>12,6</b>	1,65
	47,5-57,5	8,97	8,41	8,70	<b>8,69</b>	0,71	0,67	0,68	<b>0,69</b>	12,6	12,6	12,8	<b>12,7</b>	1,65
	57,5-67,5	7,79	7,62	8,56	<b>7,99</b>	0,65	0,66	0,69	<b>0,67</b>	12,0	11,5	12,4	<b>12,0</b>	1,65
	67,5-87,5	5,92	6,16	6,03	<b>6,04</b>	0,52	0,58	0,51	<b>0,54</b>	11,4	10,6	11,8	<b>11,3</b>	1,65
87,5-107,5	4,96	5,43	4,78	<b>5,06</b>	0,50	0,55	0,44	<b>0,50</b>	9,9	9,9	10,9	<b>10,2</b>	1,65	

<sup>1/</sup> Os valores de densidade do solo até 27,5 cm de profundidade foram obtidos a partir de Bayer (1996). Para as camadas mais profundas, se utilizou o mesmo valor de densidade da camada de 17,5-27,5 cm.

Apêndice 2. Quadro da análise de variância da concentração de C ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: camada de solo.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	12,68	6,34	0,92	0,5590 ns
Sistema de Culturas	4	714,66	178,67	25,81	0,0003 **
Resíduo (A)	8	55,37	6,92		
Parcelas	14	782,70			
Camada	9	6738,90	748,77	211,54	0,0000 **
Sis*Cam	36	1758,03	48,83	13,79	0,0000 **
Resíduo (B)	90	318,57	3,54		
Total	149	9598,20			
Média geral		15,42			
C.V. sistema de culturas		5,40 %			
C.V. camada		12,20 %			

Apêndice 3. Quadro da análise de variância da concentração de N ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: camada de solo.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	0,67	0,34	5,21	0,0352 *
Sistema de Culturas	4	4,65	1,16	18,07	0,0008 **
Resíduo (A)	8	0,51	0,06		
Parcelas	14	5,83			
Camada	9	49,73	5,53	224,83	0,0000 **
Sis*Cam	36	11,80	0,33	13,33	0,0000 **
Resíduo (B)	90	2,21	0,02		
Total	149	69,57			
Média geral		1,31			
C.V. sistema de culturas		6,14 %			
C.V. camada		11,99 %			

Apêndice 4. Quadro da análise de variância da relação C:N das amostras de solo, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas. Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: camada de solo.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	28,51	14,26	8,71	0,0100 *
Sistema de Culturas	4	15,28	3,82	2,34	0,1428 ns
Resíduo (A)	8	13,09	1,64		
Parcelas	14	56,88			
Camada	9	93,68	10,41	45,37	0,0000 **
Sis*Cam	36	23,35	0,65	2,83	0,0000 **
Resíduo (B)	90	20,64	0,23		
Total	149	194,55			
Média geral		11,84			
C.V. sistema de culturas		3,41 %			
C.V. camada		4,04 %			

Apêndice 5. Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados. Fator da parcela: sistema de culturas.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	16,19	8,10	1,03	0,4011 ns
Sistema de Culturas	4	606,11	151,53	19,31	0,0007 **
Resíduo	8	62,77	7,84		
Total	14	685,07			
Média geral		33,52			
C.V. sistema de culturas		8,36 %			

Apêndice 6. Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados. Fator da parcela: sistema de culturas.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	0,41	0,20	2,71	0,1256 ns
Sistema de Culturas	4	4,63	1,16	15,34	0,0012 **
Resíduo	8	0,60	0,07		
Total	14	5,64			
Média geral		2,97			
C.V. sistema de culturas		9,24 %			

Apêndice 7. Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados.

Fator da parcela: sistema de culturas.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	19,45	9,72	0,38	0,7002 ns
Sistema de Culturas	4	2546,99	636,75	24,77	0,0004 **
Resíduo	8	205,61	25,70		
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>2772,05</b>			
Média geral		137,39			
C.V. sistema de culturas		3,69 %			

Apêndice 8. Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito de sistema de culturas, considerando somente os tratamentos sem adubação nitrogenada, no delineamento blocos casualizados.

Fator da parcela: sistema de culturas.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	4,35	2,17	8,81	0,0098 **
Sistema de Culturas	4	14,82	3,71	15,00	0,0013 **
Resíduo	8	1,98	0,24		
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>21,15</b>			
Média geral		11,71			
C.V. sistema de culturas		4,24 %			

Apêndice 9. Quadro da análise de variância da concentração de C ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas sub-subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada; Fator da sub-subparcela: camada de solo.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	9,49	4,74	0,87	0,5134 ns
Sistema de Culturas	2	849,94	424,97	78,19	0,0017 **
Resíduo (A)	4	21,74	5,44		
Parcelas	8	881,16			
Nitrogênio	1	74,04	74,04	5,95	0,0494 *
Sis*Nit	2	5,78	2,89	0,23	0,8007 ns
Resíduo (B)	6	74,68	12,45		
Subparcelas	17	1035,66			
Camada	9	14869,75	1652,19	283,49	0,0000 **
Sis*Cam	18	2325,38	129,19	22,17	0,0000 **
Nit*Cam	9	190,92	21,21	3,64	0,0008 **
Sis*Nit*Cam	18	35,14	1,95	0,34	0,9945 ns
Resíduo (C)	108	629,42	5,83		
Total	179	19086,28			
Média geral		16,54			
C.V. sistema de culturas		3,15 %			
C.V. nitrogênio		6,74 %			
C.V. camada		14,60 %			

Apêndice 10. Quadro da análise de variância da concentração de N ( $\text{g dm}^{-3}$ ) das amostras de solo, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas sub-subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada; Fator da sub-subparcela: camada de solo.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	0,38	0,19	1,47	0,3331 ns
Sistema de Culturas	2	6,57	3,28	25,29	0,0072 **
Resíduo (A)	4	0,52	0,13		
Parcelas	8	7,47			
Nitrogênio	1	0,50	0,50	4,23	0,0839 ns
Sis*Nit	2	0,10	0,05	0,42	0,6755 ns
Resíduo (B)	6	0,71	0,12		
Subparcelas	17	8,79			
Camada	9	110,95	12,33	325,32	0,0000 **
Sis*Cam	18	17,10	0,95	25,07	0,0000 **
Nit*Cam	9	1,35	0,15	3,94	0,0004 **
Sis*Nit*Cam	18	0,29	0,02	0,42	0,9811 ns
Resíduo (C)	108	4,09	0,04		
Total	179	142,56			
Média geral		1,42			
C.V. sistema de culturas		5,67 %			
C.V. nitrogênio		7,58 %			
C.V. camada		13,71 %			



Apêndice 11. Quadro da análise de variância da relação C:N das amostras de solo, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas sub-subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada; Fator da sub-subparcela: camada de solo.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	15,72	7,86	2,72	0,1801 ns
Sistema de Culturas	2	0,65	0,32	0,11	0,8961 ns
Resíduo (A)	4	11,58	2,89		
Parcelas	8	27,94			
Nitrogênio	1	0,06	0,06	0,05	0,8235 ns
Sis*Nit	2	1,37	0,69	0,57	0,5966 ns
Resíduo (B)	6	7,22	1,20		
Subparcelas	17	36,60			
Camada	9	125,82	13,98	54,40	0,0000 **
Sis*Cam	18	15,26	0,85	3,30	0,0002 **
Nit*Cam	9	0,97	0,11	0,42	0,9233 ns
Sis*Nit*Cam	18	2,35	0,13	0,51	0,9491 ns
Resíduo (C)	108	27,76	0,25		
Total	179	208,74			
Média geral		11,73			
C.V. sistema de culturas		3,24 %			
C.V. nitrogênio		2,96 %			
C.V. camada		4,32 %			

Apêndice 12. Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	6,50	3,25	0,26	0,7828 ns
Sistema de Culturas	2	741,56	370,78	29,84	0,0057 **
Resíduo (A)	4	49,70	12,43		
Parcelas	8	797,77			
Nitrogênio	1	104,93	104,93	6,30	0,0448 **
Sis*Nit	2	15,15	7,57	0,45	0,6582 ns
Resíduo (B)	6	99,96	16,66		
Total	17	1017,80			
Média geral		36,97			
C.V. sistema de culturas		6,74 %			
C.V. camada		11,04 %			

Apêndice 13. Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-17,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	0,09	0,04	0,28	0,7689 ns
Sistema de Culturas	2	6,61	3,31	20,94	0,0095 **
Resíduo (A)	4	0,63	0,16		
Parcelas	8	7,34			
Nitrogênio	1	0,68	0,68	4,36	0,0801 ns
Sis*Nit	2	0,07	0,04	0,24	0,7970 ns
Resíduo (B)	6	0,93	0,16		
Total	17	9,02			
Média geral			3,35		
C.V. sistema de culturas			8,39 %		
C.V. camada			11,76 %		

Apêndice 14. Quadro da análise de variância do estoque total de C ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada.

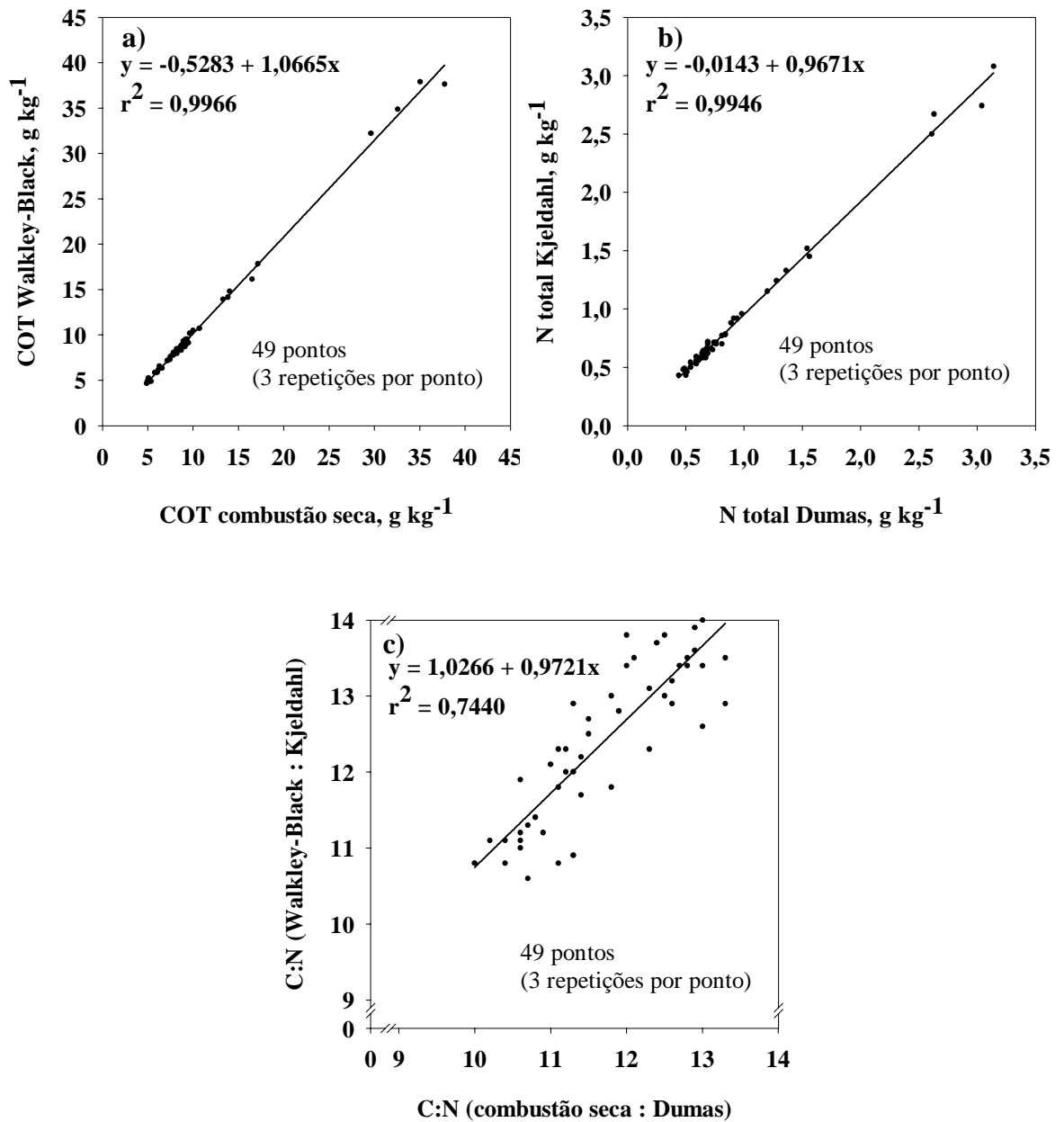
Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	21,27	10,63	0,99	0,5525 ns
Sistema de Culturas	2	2186,26	1093,13	102,33	0,0013 **
Resíduo (A)	4	42,73	10,68		
Parcelas	8	2250,25			
Nitrogênio	1	165,44	165,44	7,20	0,0355 *
Sis*Nit	2	21,59	10,80	0,47	0,6496 ns
Resíduo (B)	6	137,83	22,97		
Total	17	2575,11			
Média geral			140,94		
C.V. sistema de culturas			1,64 %		
C.V. camada			3,40 %		

Apêndice 15. Quadro da análise de variância do estoque total de N ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) na camada de 0-107,5 cm, na avaliação do efeito da adubação nitrogenada, considerando somente os sistemas de culturas AV/MI, LB+MI e GD+MI, no delineamento blocos casualizados com parcelas subdivididas.

Fator da parcela: sistema de culturas; Fator da subparcela: adubação nitrogenada.

Causas da variação	graus de liberdade	soma de quadrados	quadrado médio	valor F	Prob.>F
Blocos	2	2,34	1,17	1,99	0,2514 ns
Sistema de Culturas	2	17,23	8,61	14,65	0,0163 *
Resíduo (A)	4	2,35	0,59		
Parcelas	8	21,91			
Nitrogênio	1	0,96	0,96	2,92	0,1368 ns
Sis*Nit	2	0,66	0,33	1,00	0,4225 ns
Resíduo (B)	6	1,98	0,33		
Total	17	25,52			
Média geral			12,17		
C.V. sistema de culturas			4,45 %		
C.V. camada			4,72 %		

Apêndice 16. Relação entre os resultados obtidos por diferentes métodos de análise de C orgânico total (COT) e N total do solo. a) COT por Walkley Black versus combustão seca (analisador Vario EL); b) N total por Kjeldahl versus Dumas (analisador Vario EL); c) relação C:N por Walkley Black e Kjeldahl versus combustão seca e Dumas (analisador Vario EL).



Apêndice 17. Equações logarítmicas de distribuição granulométrica empregadas para estimativa do teor de argila das camadas de solo. A variável  $x$  refere-se ao tamanho de partícula, em  $\mu\text{m}$ ;  $y$  refere-se a proporção de partículas com tamanho  $< x$   $\mu\text{m}$ .

Camada (cm)	Ponto 1 <sup>1/</sup>	Ponto 2 <sup>2/</sup>	Ponto 3 <sup>3/</sup>	Ponto 4 <sup>4/</sup>	Equação média
0-2,5	$y=0,1726 + 0,06676 \ln x$	$y=0,1860 + 0,06096 \ln x$	$y=0,1768 + 0,06065 \ln x$	$y=0,1672 + 0,07157 \ln x$	<b><math>y=0,1757 + 0,06499 \ln x</math></b>
2,5-7,5	$y=0,1855 + 0,06314 \ln x$	$y=0,1752 + 0,06087 \ln x$	$y=0,1797 + 0,06159 \ln x$	$y=0,1602 + 0,07412 \ln x$	<b><math>y=0,1752 + 0,06493 \ln x</math></b>
7,5-17,5	$y=0,2218 + 0,06165 \ln x$	$y=0,2139 + 0,06270 \ln x$	$y=0,2378 + 0,05249 \ln x$	$y=0,1931 + 0,06300 \ln x$	<b><math>y=0,2167 + 0,05996 \ln x</math></b>
17,5-27,5	$y=0,2184 + 0,06137 \ln x$	$y=0,2475 + 0,06083 \ln x$	$y=0,2794 + 0,05489 \ln x$	$y=0,2421 + 0,05237 \ln x$	<b><math>y=0,2469 + 0,05737 \ln x</math></b>
27,5-37,5	$y=0,2168 + 0,05962 \ln x$	$y=0,3170 + 0,04767 \ln x$	$y=0,3253 + 0,04532 \ln x$	$y=0,2864 + 0,05201 \ln x$	<b><math>y=0,2864 + 0,05116 \ln x</math></b>
37,5-47,5	$y=0,3059 + 0,05842 \ln x$	$y=0,3480 + 0,05368 \ln x$	$y=0,3289 + 0,04381 \ln x$	$y=0,3158 + 0,04397 \ln x$	<b><math>y=0,3247 + 0,04997 \ln x</math></b>
47,5-57,5	$y=0,3780 + 0,05132 \ln x$	$y=0,3860 + 0,04619 \ln x$	$y=0,3445 + 0,05008 \ln x$	$y=0,3471 + 0,04637 \ln x$	<b><math>y=0,3639 + 0,04849 \ln x</math></b>
57,5-67,5	$y=0,3934 + 0,05212 \ln x$	$y=0,3756 + 0,04329 \ln x$	$y=0,3667 + 0,04998 \ln x$	$y=0,3655 + 0,04318 \ln x$	<b><math>y=0,3753 + 0,04714 \ln x</math></b>
67,5-87,5	$y=0,3562 + 0,05434 \ln x$	$y=0,4381 + 0,04329 \ln x$	$y=0,3659 + 0,04922 \ln x$	$y=0,3668 + 0,04571 \ln x$	<b><math>y=0,3818 + 0,04814 \ln x</math></b>
87,5-107,5	$y=0,3848 + 0,04753 \ln x$	$y=0,4436 + 0,04242 \ln x$	$y=0,3603 + 0,04545 \ln x$	$y=0,3601 + 0,04420 \ln x$	<b><math>y=0,3872 + 0,04490 \ln x</math></b>

<sup>1/</sup> Ponto 1. Parcela do LB+MI (sem N) da repetição 1.

<sup>2/</sup> Ponto 2. Parcela do AV/MI (sem N) da repetição 3.

<sup>3/</sup> Ponto 3. Campo nativo repetição 1 (coxilha atrás da guarita da entrada da EEA).

<sup>4/</sup> Ponto 4. Campo nativo repetição 3 (entre a área experimental e a estrada).

## Apêndice 18. Teores de argila, silte e areia das camadas de solo.

Camada (cm)	Ponto 1 <sup>1/</sup>	Ponto 2 <sup>2/</sup>	Ponto 3 <sup>3/</sup>	Ponto 4 <sup>4/</sup>	Média
<b>Argila (&lt;2 µm)</b>	----- % -----				
0-2,5	22,83	21,68	21,88	21,89	<b>22,07</b> ± 0,51
2,5-7,5	21,74	21,16	22,24	22,93	<b>22,02</b> ± 0,75
7,5-17,5	25,74	23,68	27,42	26,45	<b>25,82</b> ± 1,59
17,5-27,5	28,97	27,84	31,74	26,09	<b>28,66</b> ± 2,37
27,5-37,5	35,00	32,25	35,67	25,81	<b>32,18</b> ± 4,50
37,5-47,5	38,52	34,63	35,93	34,64	<b>35,93</b> ± 1,83
47,5-57,5	41,80	37,92	37,92	41,36	<b>39,75</b> ± 2,12
57,5-67,5	40,56	39,54	40,13	42,95	<b>40,80</b> ± 1,50
67,5-87,5	46,81	39,85	40,00	39,39	<b>41,51</b> ± 3,54
87,5-107,5	47,30	39,07	39,18	41,77	<b>41,83</b> ± 3,85
<b>Silte (2-53 µm)</b>					
0-2,5	20,62	26,26	25,17	25,15	<b>24,30</b> ± 2,51
2,5-7,5	22,74	25,69	23,83	20,74	<b>23,25</b> ± 2,07
7,5-17,5	22,07	23,11	21,21	20,39	<b>21,69</b> ± 1,17
17,5-27,5	23,32	20,71	20,11	21,70	<b>21,46</b> ± 1,40
27,5-37,5	18,62	20,19	18,98	21,29	<b>19,77</b> ± 1,21
37,5-47,5	18,12	17,36	16,32	20,61	<b>18,10</b> ± 1,83
47,5-57,5	15,83	17,44	19,04	18,71	<b>17,76</b> ± 1,46
57,5-67,5	14,17	16,43	17,80	17,98	<b>16,60</b> ± 1,76
67,5-87,5	15,49	16,69	19,77	19,15	<b>17,77</b> ± 2,02
87,5-107,5	14,45	17,08	19,21	16,13	<b>16,72</b> ± 1,99
<b>Areia (&gt;53 µm)</b>					
0-2,5	56,56	52,05	52,95	52,96	<b>53,63</b> ± 2,00
2,5-7,5	55,52	53,15	53,93	56,33	<b>54,73</b> ± 1,45
7,5-17,5	52,20	53,21	51,37	53,16	<b>52,48</b> ± 0,88
17,5-27,5	47,71	51,45	48,15	52,20	<b>49,88</b> ± 2,28
27,5-37,5	46,38	47,56	45,35	52,90	<b>48,05</b> ± 3,36
37,5-47,5	43,36	48,01	47,75	44,75	<b>45,97</b> ± 2,28
47,5-57,5	42,37	44,64	43,04	39,93	<b>42,49</b> ± 1,96
57,5-67,5	45,27	44,02	42,07	39,06	<b>42,61</b> ± 2,71
67,5-87,5	37,70	43,46	40,23	41,46	<b>40,72</b> ± 2,41
87,5-107,5	38,25	43,84	41,61	42,09	<b>41,45</b> ± 2,34

<sup>1/</sup> Ponto 1. Parcela do LB+MI (sem N) da repetição 1.

<sup>2/</sup> Ponto 2. Parcela do AV/MI (sem N) da repetição 3.

<sup>3/</sup> Ponto 3. Campo nativo repetição 1 (coxilha atrás da guarita da entrada da EEA).

<sup>4/</sup> Ponto 4. Campo nativo repetição 3 (entre a área experimental e a estrada).

Apêndice 19. Proporção de massa recuperada após o fracionamento físico e dados originais de concentração de C e N, obtidos com analisador Vario EL, e relação C:N das frações físicas do solo.

tratamento	camada (cm)	fração	% massa total <sup>1/</sup>	carbono			nitrogênio			relação C:N		
				Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média
----- g kg <sup>-1</sup> de fração -----												
campo nativo	0-2,5	MOP	0,84	266,60	270,20	268,40	11,88	11,93	11,91	22,44	22,65	22,55
		areia pesada	50,58	0,97	0,97	0,97	0,15	0,14	0,15	6,47	6,93	6,70
		silte	24,50	26,77	25,97	26,37	2,11	1,99	2,05	12,69	13,05	12,86
		argila	22,79	49,07	50,28	49,68	4,76	5,00	4,88	10,31	10,06	10,18
		total	98,71									
	2,5-7,5	MOP	0,41	248,30	245,90	247,10	9,72	9,90	9,81	25,55	24,84	25,19
		areia pesada	53,81	0,48	0,49	0,49	0,08	0,10	0,09	6,00	4,90	5,45
		silte	22,47	17,12	17,17	17,15	1,54	1,46	1,50	11,12	11,76	11,43
		argila	22,49	40,77	41,54	41,16	3,97	4,03	4,00	10,27	10,31	10,29
		total	99,18									
	37,5-47,5	MOP	0,06	316,40	325,60	321,00	12,38	11,93	12,16	25,56	27,29	26,41
		areia pesada	44,93	0,17	0,16	0,17	0,14	0,08	0,11	1,21	2,00	1,61
silte		16,57	4,98	4,88	4,93	0,45	0,52	0,49	11,07	9,38	10,23	
argila		37,64	19,29	19,39	19,34	1,76	1,89	1,83	10,96	10,26	10,60	
total		99,20										
descoberto	0-2,5	MOP	0,65	257,30	257,10	257,20	16,78	16,27	16,53	15,33	15,80	15,56
		areia pesada	55,71	0,74	0,77	0,76	0,15	0,11	0,13	4,93	7,00	5,97
		silte	21,31	18,62	18,98	18,80	1,55	1,58	1,57	12,01	12,01	12,01
		argila	20,62	32,18	32,49	32,34	3,47	3,46	3,47	9,27	9,39	9,33
		total	98,29									
	2,5-7,5	MOP	0,40	109,70	109,60	109,65	6,67	6,65	6,66	16,45	16,48	16,46
		areia pesada	53,50	0,27	0,28	0,28	0,13	0,10	0,12	2,08	2,80	2,44
		silte	21,70	9,17	9,13	9,15	0,84	0,81	0,83	10,92	11,27	11,09
		argila	23,09	26,22	26,01	26,12	2,75	2,69	2,72	9,53	9,67	9,60
		total	98,69									
	37,5-47,5	MOP	0,01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
		areia pesada	42,51	0,18	0,17	0,18	0,11	0,11	0,11	1,64	1,55	1,59
silte		17,62	3,96	4,04	4,00	0,44	0,40	0,42	9,00	10,10	9,52	
argila		37,25	17,50	17,71	17,61	1,56	1,63	1,60	11,22	10,87	11,04	
total		97,39										

continua ...

... continuação do Apêndice 19

tratamento	camada (cm)	fração	% massa total <sup>1/</sup>	carbono			nitrogênio			relação C:N		
				Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média
----- g kg <sup>-1</sup> de fração -----												
AV/MI (sem N)	0-2,5	MOP	0,34	256,90	257,20	257,05	15,74	15,84	15,79	16,32	16,24	16,28
		areia pesada	53,73	0,39	0,36	0,38	0,16	0,13	0,15	2,44	2,77	2,60
		silte	23,58	19,41	19,70	19,56	1,66	1,59	1,63	11,69	12,39	12,03
		argila	21,17	35,49	36,78	36,14	3,77	3,76	3,77	9,41	9,78	9,60
	total	98,82										
	2,5-7,5	MOP	0,15	228,20	228,50	228,35	14,58	14,63	14,61	15,65	15,62	15,64
		areia pesada	53,88	0,26	0,23	0,25	0,09	0,06	0,08	2,89	3,83	3,36
		silte	22,70	10,90	10,81	10,86	1,04	0,95	1,00	10,48	11,38	10,91
		argila	22,43	29,62	29,18	29,40	3,16	3,05	3,11	9,37	9,57	9,47
	total	99,16										
	37,5-47,5	MOP	0,01	339,20	341,60	340,40	17,53	19,90	18,72	19,35	17,17	18,26
		areia pesada	42,26	0,23	0,18	0,21	0,12	0,04	0,08	1,92	4,50	3,21
silte		17,86	3,56	3,50	3,53	0,42	0,35	0,39	8,48	10,00	9,24	
argila		39,00	18,03	18,02	18,03	1,75	1,72	1,74	10,30	10,48	10,39	
total	99,13											
AV/MI (com N)	0-2,5	MOP	0,64	259,30	259,10	259,20	15,20	15,28	15,24	17,06	16,96	17,01
		areia pesada	52,13	0,43	0,43	0,43	0,17	0,10	0,14	2,53	4,30	3,41
		silte	23,86	22,16	22,42	22,29	1,73	1,78	1,76	12,81	12,60	12,70
		argila	22,16	37,95	38,54	38,25	3,96	3,81	3,89	9,58	10,12	9,84
	total	98,79										
	2,5-7,5	MOP	0,19	239,50	239,80	239,65	16,03	16,19	16,11	14,94	14,81	14,88
		areia pesada	52,61	0,29	0,29	0,29	0,13	0,12	0,13	2,23	2,42	2,32
		silte	22,62	12,90	12,92	12,91	1,20	1,22	1,21	10,75	10,59	10,67
		argila	23,61	31,01	31,29	31,15	3,31	3,33	3,32	9,37	9,40	9,38
	total	99,03										
	37,5-47,5	MOP	0,01	374,60	N.D.	374,60	20,61	N.D.	20,61	18,18	N.D.	18,18
		areia pesada	40,16	0,18	0,18	0,18	0,10	0,07	0,09	1,80	2,57	2,19
silte		18,64	3,49	3,54	3,52	0,42	0,38	0,40	8,31	9,32	8,79	
argila		40,37	18,17	18,18	18,18	1,58	1,69	1,64	11,50	10,76	11,12	
total	99,18											

continua ...



... continuação do Apêndice 19

tratamento	camada (cm)	fração	% massa total <sup>1/</sup>	carbono			nitrogênio			relação C:N		
				Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média
----- g kg <sup>-1</sup> de fração -----												
LB+MI (sem N)	0-2,5	MOP	2,42	279,90	284,50	282,20	20,76	20,78	20,77	13,48	13,69	13,59
		areia pesada	51,31	0,69	0,74	0,72	0,13	0,44	0,14	5,31	5,29	5,30
		silte	22,94	37,40	36,81	37,11	3,02	3,04	3,03	12,38	12,11	12,25
		argila	21,61	53,22	52,92	53,07	5,40	5,51	5,46	9,86	9,60	9,73
	total	98,28										
	2,5-7,5	MOP	0,38	231,60	232,20	231,90	17,26	17,15	17,21	13,42	13,54	13,48
		areia pesada	53,49	0,30	0,30	0,30	0,12	0,10	0,11	2,50	3,00	2,75
		silte	22,31	18,05	18,06	18,06	1,61	1,59	1,60	11,21	11,36	11,28
		argila	22,80	34,97	33,82	34,40	3,78	3,67	3,73	9,25	9,22	9,23
	total	98,98										
	37,5-47,5	MOP	0,03	305,00	306,20	305,60	20,88	21,66	21,27	14,61	14,14	14,37
		areia pesada	46,71	0,17	0,18	0,18	0,07	0,10	0,09	2,43	1,80	2,11
silte		17,05	4,64	4,64	4,64	0,45	0,44	0,45	10,31	10,55	10,43	
argila		35,18	20,19	20,24	20,22	1,73	1,69	1,71	11,67	11,98	11,82	
total	98,97											
LB+MI (com N)	0-2,5	MOP	3,49	299,30	302,50	300,90	23,23	22,94	23,09	12,88	13,19	13,03
		areia pesada	51,56	0,58	0,61	0,60	0,15	0,14	0,15	3,87	4,36	4,11
		silte	20,83	39,34	40,14	39,74	3,12	3,23	3,18	12,61	12,43	12,52
		argila	22,45	55,62	56,81	56,22	5,88	5,91	5,90	9,46	9,61	9,54
	total	98,33										
	2,5-7,5	MOP	0,63	239,10	228,60	233,85	15,75	17,98	16,87	15,18	12,71	13,87
		areia pesada	53,37	0,24	0,24	0,24	0,08	0,11	0,10	3,00	2,18	2,59
		silte	21,62	18,26	18,28	18,27	1,63	1,57	1,60	11,20	11,64	11,42
		argila	23,11	38,93	38,28	38,61	4,23	4,24	4,24	9,20	9,03	9,12
	total	98,73										
	37,5-47,5	MOP	0,05	221,40	217,60	219,50	15,53	15,19	15,36	14,26	14,33	14,29
		areia pesada	43,20	0,11	0,13	0,12	0,12	0,10	0,11	0,92	1,30	1,11
silte		18,94	4,50	4,46	4,48	0,41	0,38	0,40	10,98	11,74	11,34	
argila		35,96	21,49	21,13	21,31	1,97	1,93	1,95	10,91	10,95	10,93	
total	98,15											

continua ...

... continuação do Apêndice 19

tratamento	camada (cm)	fração	% massa total <sup>1/</sup>	carbono			nitrogênio			relação C:N		
				Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média	Duplic. 1	Duplic. 2	média
----- g kg <sup>-1</sup> de fração -----												
GD+MI (sem N)	0-2,5	MOP	2,95	300,40	303,70	302,05	20,27	19,96	20,12	14,82	15,22	15,02
		areia pesada	51,73	0,99	0,94	0,97	0,14	0,17	0,16	7,07	5,53	6,30
		silte	22,60	41,70	42,60	42,15	2,98	3,05	3,02	13,99	13,97	13,98
		argila	21,04	46,81	46,56	46,69	4,66	4,80	4,73	10,05	9,70	9,87
	total	98,32										
	2,5-7,5	MOP	0,50	239,60	240,60	240,10	16,08	16,12	16,10	14,90	14,93	14,91
		areia pesada	53,94	0,32	0,33	0,33	0,13	0,07	0,10	2,46	4,71	3,59
		silte	21,88	18,30	18,30	18,30	1,54	1,45	1,50	11,88	12,62	12,24
		argila	22,95	33,18	33,29	33,24	3,53	3,68	3,61	9,40	9,05	9,22
	total	99,27										
	37,5-47,5	MOP	0,04	361,40	365,50	363,45	22,65	21,87	22,26	15,96	16,71	16,33
		areia pesada	41,31	0,18	0,18	0,18	0,11	0,09	0,10	1,64	2,00	1,82
silte		18,49	4,67	4,71	4,69	0,48	0,46	0,47	9,73	10,24	9,98	
argila		39,05	19,71	19,53	19,62	1,74	1,75	1,75	11,33	11,16	11,24	
total	98,89											
GD+MI (com N)	0-2,5	MOP	3,62	313,50	316,70	315,10	22,76	22,92	22,84	13,77	13,82	13,80
		areia pesada	50,54	0,84	0,83	0,84	0,16	0,12	0,14	5,25	6,92	6,08
		silte	22,46	47,80	48,06	47,93	3,23	3,46	3,35	14,80	13,89	14,33
		argila	22,67	50,60	51,19	50,90	5,32	5,21	5,27	9,51	9,83	9,67
	total	99,29										
	2,5-7,5	MOP	0,54	260,20	259,70	259,95	18,32	18,85	18,59	14,20	13,78	13,99
		areia pesada	52,04	0,28	0,28	0,28	0,11	0,06	0,09	2,55	4,67	3,61
		silte	22,63	22,86	22,88	22,87	1,88	1,85	1,87	12,16	12,37	12,26
		argila	22,99	38,68	39,06	38,87	3,94	4,21	4,08	9,82	9,28	9,54
	total	98,20										
	37,5-47,5	MOP	0,03	248,90	248,90	248,90	17,58	16,29	16,94	14,16	15,28	14,70
		areia pesada	43,33	0,13	0,13	0,13	0,10	0,12	0,11	1,30	1,08	1,19
silte		18,83	4,51	4,56	4,54	0,41	0,41	0,41	11,00	11,12	11,06	
argila		36,26	21,41	21,08	21,25	1,85	2,00	1,93	11,57	10,54	11,04	
total	98,45											

<sup>1/</sup> refere-se à proporção da massa da amostra integral de solo obtida após o fracionamento.  
N.D. = não determinado, devido à quantidade insuficiente de material.

Apêndice 20. Proporção dos diferentes tipos de C na parte aérea da vegetação do campo nativo e das plantas dos sistemas de culturas.

Tratamento	distribuição dos tipos de C										
	aldeído e cetona ppm: 220-185	carboxila, éster e amida 185-160	<b>C carbonila</b> <b>220-160</b>	C O- substituído (fenol) 160-140	C C-, H- substituído 140-110	<b>C</b> <b>aromático</b> <b>160-110</b>	carboidrato (anomerico) 110-90	carboidrato (C2-C6) 90-60	metoxila e aminoácido 60-45	<b>C</b> <b>O-alkil</b> <b>110-45</b>	<b>C</b> <b>alkil</b> <b>45-(-10)</b>
----- % -----											
<b>Planta de cobertura <sup>1/</sup></b>											
campo nativo	1,6	4,2	<b>5,8</b>	3,3	7,9	<b>11,2</b>	12,5	53,8	7,0	<b>73,2</b>	<b>9,7</b>
solo descoberto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AV/MI (sem N)	1,3	4,4	<b>5,7</b>	1,6	5,8	<b>7,4</b>	12,7	56,3	6,7	<b>75,6</b>	<b>11,2</b>
AV/MI (com N)	1,4	4,6	<b>6,1</b>	1,7	4,9	<b>6,6</b>	12,4	55,8	7,6	<b>75,8</b>	<b>11,5</b>
GD+MI (sem N)	0,6	7,1	<b>7,7</b>	3,3	7,0	<b>10,3</b>	10,2	44,9	8,6	<b>63,7</b>	<b>18,3</b>
GD+MI (com N)	0,5	8,0	<b>8,5</b>	3,9	8,6	<b>12,5</b>	10,8	43,0	7,9	<b>61,8</b>	<b>17,3</b>
<b>Planta de milho</b>											
campo nativo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
solo descoberto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AV/MI (sem N)	0,9	3,0	<b>3,9</b>	2,2	6,0	<b>8,3</b>	13,9	60,1	7,0	<b>80,9</b>	<b>6,9</b>
AV/MI (com N)	1,2	2,6	<b>3,7</b>	2,8	7,1	<b>9,7</b>	14,1	58,9	7,0	<b>80,0</b>	<b>6,3</b>
GD+MI (sem N)	1,4	3,0	<b>4,4</b>	2,6	7,0	<b>9,7</b>	13,9	58,7	6,8	<b>79,4</b>	<b>6,5</b>
GD+MI (com N)	1,1	3,1	<b>4,2</b>	2,7	6,7	<b>9,4</b>	13,4	58,5	7,4	<b>79,4</b>	<b>7,0</b>

<sup>1/</sup> No sistema AV/MI a planta de cobertura é a aveia preta e no sistema GD+MI é o guandu.

Apêndice 21. Proporção dos diferentes tipos de C no solo integral e nas frações físicas da camada de 0-2,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

Tratamento	distribuição dos tipos de C										
	aldeído e cetona	carboxila, éster e amida	<b>C carbonila</b>	C O- substituído (fenol)	C C-, H- substituído	<b>C</b> <b>aromático</b>	carboidrato (anomerico)	carboidrato (C2-C6)	metoxila e aminoácido	<b>C</b> <b>O-alkil</b>	<b>C</b> <b>alkil</b>
ppm:	220-185	185-160	<b>220-160</b>	160-140	140-110	<b>160-110</b>	110-90	90-60	60-45	<b>110-45</b>	<b>45-(-10)</b>
<b>solo integral</b>											
campo nativo	2,8	10,0	<b>12,8</b>	3,0	9,6	<b>12,6</b>	7,3	31,4	9,2	<b>47,9</b>	<b>26,7</b>
solo descoberto	2,6	9,6	<b>12,2</b>	3,2	10,6	<b>13,8</b>	7,4	30,6	9,9	<b>47,9</b>	<b>24,9</b>
AV/MI (sem N)	2,6	9,3	<b>11,9</b>	3,0	10,4	<b>13,4</b>	7,7	31,6	10,7	<b>50,0</b>	<b>24,7</b>
AV/MI (com N)	3,0	9,1	<b>12,1</b>	3,0	10,4	<b>13,4</b>	7,7	31,7	10,6	<b>49,9</b>	<b>24,5</b>
GD+MI (sem N)	2,8	9,9	<b>12,7</b>	4,9	11,4	<b>16,4</b>	8,1	27,8	10,4	<b>46,3</b>	<b>24,6</b>
GD+MI (com N)	4,0	11,0	<b>14,9</b>	5,0	11,4	<b>16,4</b>	7,5	26,3	9,8	<b>43,6</b>	<b>25,0</b>
<b>MOP</b>											
campo nativo	2,5	5,7	<b>8,2</b>	4,2	10,8	<b>14,9</b>	10,8	44,2	8,1	<b>63,1</b>	<b>13,8</b>
solo descoberto	3,0	7,5	<b>10,5</b>	4,5	11,3	<b>15,8</b>	8,8	36,3	9,4	<b>54,6</b>	<b>19,1</b>
AV/MI (sem N)	1,3	5,6	<b>7,0</b>	3,4	10,6	<b>14,0</b>	10,1	39,5	10,9	<b>60,5</b>	<b>18,5</b>
AV/MI (com N)	2,6	6,2	<b>8,8</b>	4,0	10,8	<b>14,8</b>	9,6	39,4	10,7	<b>59,7</b>	<b>16,7</b>
GD+MI (sem N)	2,6	7,7	<b>10,3</b>	5,1	11,2	<b>16,3</b>	9,0	32,4	10,6	<b>52,0</b>	<b>21,3</b>
GD+MI (com N)	2,5	7,8	<b>10,3</b>	4,8	10,6	<b>15,4</b>	8,7	32,9	10,4	<b>52,0</b>	<b>22,3</b>
<b>silte</b>											
campo nativo	3,4	9,0	<b>12,5</b>	4,6	10,6	<b>15,2</b>	8,0	29,2	8,8	<b>46,0</b>	<b>26,3</b>
solo descoberto	3,3	9,5	<b>12,8</b>	5,7	13,6	<b>19,4</b>	8,3	27,6	9,5	<b>45,4</b>	<b>22,4</b>
AV/MI (sem N)	3,9	10,2	<b>14,1</b>	6,0	14,3	<b>20,3</b>	8,2	26,9	9,6	<b>44,6</b>	<b>20,9</b>
AV/MI (com N)	3,9	10,2	<b>14,1</b>	6,2	13,3	<b>19,5</b>	8,4	27,9	9,5	<b>45,8</b>	<b>20,6</b>
GD+MI (sem N)	3,3	9,3	<b>12,6</b>	6,4	12,4	<b>18,9</b>	8,2	27,3	10,4	<b>46,0</b>	<b>22,5</b>
GD+MI (com N)	2,8	9,2	<b>12,0</b>	6,2	12,1	<b>18,3</b>	8,3	27,1	10,2	<b>45,6</b>	<b>24,1</b>
<b>argila</b>											
campo nativo	3,1	9,1	<b>12,2</b>	2,1	6,9	<b>9,0</b>	7,7	29,8	10,1	<b>47,6</b>	<b>31,2</b>
solo descoberto	4,1	11,1	<b>15,2</b>	3,6	10,1	<b>13,7</b>	8,7	28,5	10,0	<b>47,3</b>	<b>23,8</b>
AV/MI (sem N)	2,2	10,0	<b>12,2</b>	3,7	10,2	<b>13,8</b>	9,2	30,0	10,2	<b>49,3</b>	<b>24,6</b>
AV/MI (com N)	4,9	10,1	<b>15,0</b>	3,3	8,5	<b>11,8</b>	8,5	28,8	10,0	<b>47,3</b>	<b>25,9</b>
GD+MI (sem N)	2,8	10,4	<b>13,3</b>	4,2	10,4	<b>14,7</b>	8,9	28,5	10,5	<b>47,9</b>	<b>24,1</b>
GD+MI (com N)	3,7	10,0	<b>13,7</b>	3,2	8,4	<b>11,6</b>	7,3	26,3	10,3	<b>43,9</b>	<b>30,7</b>

Apêndice 22. Proporção dos diferentes tipos de C no solo integral e nas frações físicas da camada de 2,5-7,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto com dois níveis de adubação nitrogenada.

Tratamento	distribuição dos tipos de C										
	aldeído e cetona	carboxila, éster e amida	<b>C carbonila</b>	C O- substituído (fenol)	C C-, H- substituído	<b>C</b> <b>aromático</b>	carboidrato (anomerico)	carboidrato (C2-C6)	metoxila e aminoácido	<b>C</b> <b>O-alkil</b>	<b>C</b> <b>alkil</b>
	ppm: 220-185	185-160	<b>220-160</b>	160-140	140-110	<b>160-110</b>	110-90	90-60	60-45	<b>110-45</b>	<b>45-(-10)</b>
<b>solo integral</b>	----- % -----										
campo nativo	2,2	10,3	<b>12,5</b>	2,6	9,4	<b>12,0</b>	7,7	31,4	9,2	<b>48,3</b>	<b>27,1</b>
solo descoberto	2,8	11,5	<b>14,3</b>	3,1	11,6	<b>14,7</b>	6,8	27,8	9,5	<b>44,1</b>	<b>26,8</b>
AV/MI (sem N)	4,5	12,2	<b>16,7</b>	3,5	11,4	<b>14,9</b>	6,7	27,2	9,6	<b>43,4</b>	<b>24,9</b>
AV/MI (com N)	3,8	11,7	<b>15,5</b>	3,5	11,7	<b>15,2</b>	7,4	29,0	9,6	<b>46,0</b>	<b>23,2</b>
GD+MI (sem N)	3,8	11,9	<b>15,7</b>	4,2	11,7	<b>15,9</b>	7,6	27,4	9,7	<b>44,8</b>	<b>23,6</b>
GD+MI (com N)	2,8	11,1	<b>13,9</b>	4,0	11,1	<b>15,1</b>	7,1	26,6	10,4	<b>44,0</b>	<b>27,0</b>
<b>MOP</b>											
campo nativo	1,3	4,2	<b>5,6</b>	3,5	9,9	<b>13,4</b>	11,7	46,5	8,4	<b>66,6</b>	<b>14,4</b>
solo descoberto	2,9	7,5	<b>10,4</b>	5,5	13,9	<b>19,4</b>	10,5	35,8	8,2	<b>54,5</b>	<b>15,7</b>
AV/MI (sem N)	2,7	8,4	<b>11,0</b>	5,9	13,7	<b>19,7</b>	10,0	32,5	10,1	<b>52,6</b>	<b>16,7</b>
AV/MI (com N)	2,6	7,4	<b>10,0</b>	5,2	13,3	<b>18,6</b>	9,8	33,4	10,0	<b>53,2</b>	<b>18,2</b>
GD+MI (sem N)	2,3	8,3	<b>10,6</b>	5,5	12,9	<b>18,4</b>	9,0	31,2	10,5	<b>50,8</b>	<b>20,2</b>
GD+MI (com N)	1,9	7,1	<b>9,0</b>	4,8	12,3	<b>17,1</b>	10,2	34,3	10,6	<b>55,1</b>	<b>18,8</b>
<b>silte</b>											
campo nativo	2,3	9,6	<b>11,9</b>	4,2	11,3	<b>15,5</b>	8,00	28,5	9,0	<b>45,5</b>	<b>27,1</b>
solo descoberto	4,0	11,7	<b>15,7</b>	6,5	15,4	<b>22,0</b>	7,9	21,8	8,6	<b>38,3</b>	<b>24,0</b>
AV/MI (sem N)	4,1	10,8	<b>14,8</b>	7,0	15,3	<b>22,2</b>	7,9	24,3	8,7	<b>41,0</b>	<b>21,9</b>
AV/MI (com N)	4,0	10,7	<b>14,7</b>	5,8	14,3	<b>20,1</b>	8,2	24,9	9,1	<b>42,2</b>	<b>23,0</b>
GD+MI (sem N)	3,4	10,6	<b>14,0</b>	6,8	13,6	<b>20,4</b>	8,1	24,4	9,8	<b>42,4</b>	<b>23,2</b>
GD+MI (com N)	4,5	10,5	<b>15,0</b>	6,3	13,0	<b>19,3</b>	7,8	24,0	9,2	<b>41,0</b>	<b>24,6</b>
<b>argila</b>											
campo nativo	3,1	10,0	<b>13,2</b>	2,3	7,3	<b>9,6</b>	8,3	29,9	9,8	<b>48,0</b>	<b>29,3</b>
solo descoberto	3,7	11,4	<b>15,1</b>	4,4	11,2	<b>15,7</b>	9,0	27,0	9,4	<b>45,5</b>	<b>23,8</b>
AV/MI (sem N)	3,7	11,3	<b>15,0</b>	3,2	9,4	<b>12,6</b>	8,4	28,4	9,7	<b>46,5</b>	<b>25,8</b>
AV/MI (com N)	3,6	10,0	<b>13,6</b>	2,7	7,6	<b>10,2</b>	7,8	28,8	10,5	<b>47,1</b>	<b>29,0</b>
GD+MI (sem N)	2,9	10,6	<b>13,5</b>	3,6	10,0	<b>13,6</b>	9,4	30,4	9,7	<b>49,5</b>	<b>23,4</b>
GD+MI (com N)	4,4	11,7	<b>16,2</b>	3,7	9,5	<b>13,1</b>	8,8	26,3	9,3	<b>44,3</b>	<b>26,4</b>

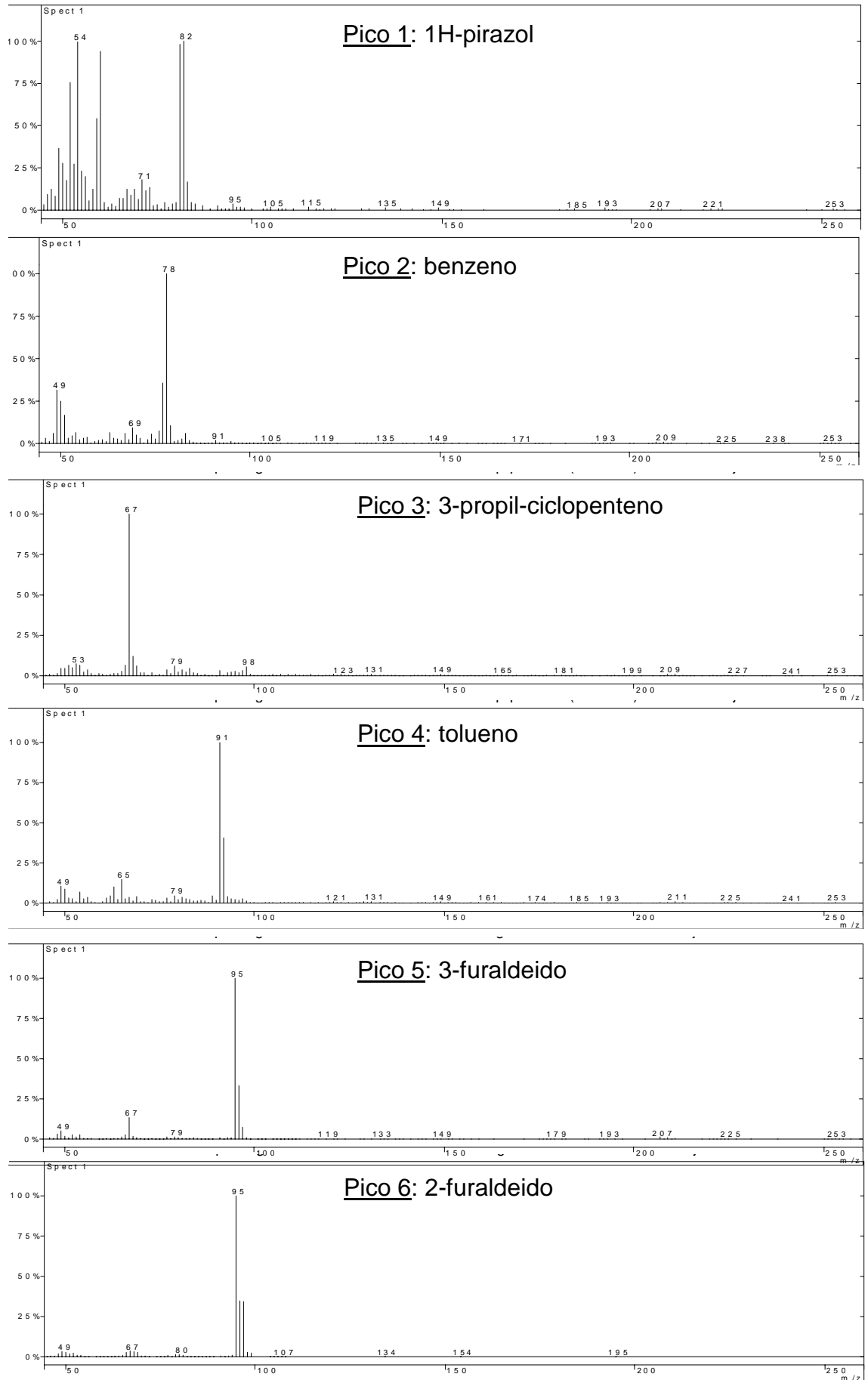
Apêndice 23. Proporção dos diferentes tipos de C no solo integral e nas frações físicas da camada de 37,5-47,5 cm do campo nativo e dos sistemas de culturas sob plantio direto e com dois níveis de adubação nitrogenada.

Tratamento	distribuição dos tipos de C										
	aldeído e cetona	carboxila, éster e amida	<b>C carbonila</b>	C O- substituído (fenol)	C C-, H- substituído	<b>C</b> <b>aromático</b>	carboidrato (anomerico)	carboidrato (C2-C6)	metoxila e aminoácido	<b>C</b> <b>O-alkil</b>	<b>C</b> <b>alkil</b>
	ppm: 220-185	185-160	<b>220-160</b>	160-140	140-110	<b>160-110</b>	110-90	90-60	60-45	<b>110-45</b>	<b>45-(-10)</b>
<b>solo integral</b>	----- % -----										
campo nativo	3,1	11,4	<b>14,5</b>	3,8	13,4	<b>17,2</b>	7,6	28,2	8,8	<b>44,6</b>	<b>23,6</b>
solo descoberto	2,3	12,5	<b>14,7</b>	4,8	16,4	<b>21,3</b>	8,0	25,0	8,4	<b>41,5</b>	<b>22,5</b>
AV/MI (sem N)	3,4	12,6	<b>16,0</b>	3,5	13,4	<b>16,8</b>	6,9	26,9	9,0	<b>42,8</b>	<b>24,4</b>
AV/MI (com N)	3,7	12,4	<b>16,1</b>	3,8	13,9	<b>17,7</b>	7,1	26,0	8,5	<b>41,7</b>	<b>24,5</b>
GD+MI (sem N)	2,8	11,8	<b>14,6</b>	4,2	15,1	<b>19,4</b>	7,7	26,0	8,8	<b>42,4</b>	<b>23,6</b>
GD+MI (com N)	4,0	12,4	<b>16,5</b>	4,0	14,8	<b>18,7</b>	7,2	25,9	8,2	<b>41,3</b>	<b>23,5</b>
<b>MOP</b>											
campo nativo	2,9	5,5	<b>8,4</b>	5,6	15,3	<b>20,9</b>	11,2	40,4	6,4	<b>58,0</b>	<b>12,7</b>
solo descoberto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AV/MI (sem N)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AV/MI (com N)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GD+MI (sem N)	1,2	6,6	<b>7,7</b>	6,0	14,5	<b>20,5</b>	10,5	31,8	9,8	<b>52,2</b>	<b>19,6</b>
GD+MI (com N)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>silte</b>											
campo nativo	3,0	11,8	<b>14,8</b>	6,7	22,7	<b>29,4</b>	6,3	21,7	7,0	<b>35,1</b>	<b>20,7</b>
solo descoberto	4,3	11,3	<b>15,7</b>	8,6	23,9	<b>32,5</b>	7,4	18,5	6,8	<b>32,7</b>	<b>19,1</b>
AV/MI (sem N)	5,0	13,3	<b>18,3</b>	9,0	24,6	<b>33,6</b>	6,1	16,7	6,0	<b>28,9</b>	<b>19,2</b>
AV/MI (com N)	7,5	13,8	<b>21,4</b>	8,6	23,4	<b>31,9</b>	3,5	14,8	5,6	<b>23,8</b>	<b>22,5</b>
GD+MI (sem N)	3,8	12,1	<b>15,9</b>	7,1	22,8	<b>29,9</b>	6,9	19,3	7,2	<b>33,4</b>	<b>20,8</b>
GD+MI (com N)	6,8	14,7	<b>21,6</b>	9,0	24,4	<b>33,3</b>	4,7	15,9	5,4	<b>26,1</b>	<b>18,9</b>
<b>argila</b>											
campo nativo	2,5	10,3	<b>12,8</b>	2,0	10,0	<b>12,0</b>	7,8	32,5	9,9	<b>50,0</b>	<b>25,3</b>
solo descoberto	4,0	12,5	<b>16,5</b>	2,9	12,0	<b>14,9</b>	6,3	26,3	9,0	<b>41,5</b>	<b>27,0</b>
AV/MI (sem N)	2,5	10,0	<b>12,5</b>	2,6	10,3	<b>12,9</b>	8,2	31,9	10,1	<b>50,2</b>	<b>24,4</b>
AV/MI (com N)	2,8	10,4	<b>13,2</b>	2,2	10,1	<b>12,4</b>	7,9	31,3	10,0	<b>49,3</b>	<b>25,1</b>
GD+MI (sem N)	2,7	11,3	<b>14,0</b>	2,1	10,8	<b>12,9</b>	7,3	30,4	9,6	<b>47,3</b>	<b>25,7</b>
GD+MI (com N)	3,3	14,6	<b>17,9</b>	3,7	14,6	<b>18,3</b>	6,7	24,4	7,8	<b>38,8</b>	<b>25,3</b>

Apêndice 24. Dados originais dos valores de massa hidrolisável, N-aminoácido e N-não hidrolisável, obtidos por hidrólise ácida.

tratamento	massa hidrolisável				N-aminoácido				N-não hidrolisável			
	Rep. I	Rep. II	Rep III	média	Rep. I	Rep. II	Rep III	média	Rep. I	Rep. II	Rep III	média
<i>solo integral, 0-2,5 cm</i>												
campo nativo	13,9	17,6	15,6	15,7	33,4	41,1	40,8	38,4	-	25,1	26,6	25,8
solo descoberto	15,1	15,6	8,1	12,9	-	38,4	36,8	37,6	24,4	29,6	34,0	29,3
AV/MI (sem N)	15,2	14,4	14,4	14,6	36,0	35,3	40,5	37,3	26,8	23,7	28,5	26,3
AV/MI (com N)	16,2	16,6	15,1	16,0	36,4	36,9	41,4	38,2	22,4	22,7	32,3	25,8
GD+MI (sem N)	18,7	15,3	15,4	16,4	32,1	36,8	39,7	36,2	16,8	23,9	23,2	21,3
GD+MI (com N)	16,9	19,4	21,2	19,2	-	38,5	37,9	38,2	-	22,9	27,7	25,3
<i>argila, 0-2,5 cm</i>												
campo nativo	51,6	46,4	-	49,0	37,3	34,7	-	36,0	19,8	23,5	-	21,7
solo descoberto	51,2	35,4	-	43,3	33,5	-	-	33,5	20,8	44,3	-	32,6
AV/MI (sem N)	50,7	42,7	-	46,7	31,8	28,1	-	30,0	24,5	33,0	-	28,7
AV/MI (com N)	51,4	50,0	-	50,7	29,9	31,2	-	30,6	25,8	27,7	-	26,8
GD+MI (sem N)	52,4	47,1	-	49,8	36,8	33,5	-	35,2	24,5	24,1	-	24,3
GD+MI (com N)	52,2	52,3	-	52,3	34,4	34,3	-	34,4	24,1	22,6	-	23,4
<i>solo integral, 2,5-7,5 cm</i>												
campo nativo	13,6	16,6	15,4	15,2	38,7	37,0	40,6	38,8	26,7	29,0	25,7	27,2
solo descoberto	14,5	14,7	15,7	15,0	35,9	32,5	35,0	34,5	39,1	33,9	48,0	40,4
AV/MI (sem N)	13,1	15,0	13,9	14,0	36,7	36,6	38,3	37,2	32,8	26,6	34,9	31,4
AV/MI (com N)	14,3	15,7	15,3	15,1	34,3	38,5	36,0	36,3	27,6	33,0	33,7	31,4
GD+MI (sem N)	14,3	15,4	15,1	14,9	35,8	35,9	36,6	36,1	31,7	29,5	29,8	30,3
GD+MI (com N)	14,8	15,9	15,2	15,3	33,7	36,1	34,5	34,8	31,5	28,9	29,2	29,8

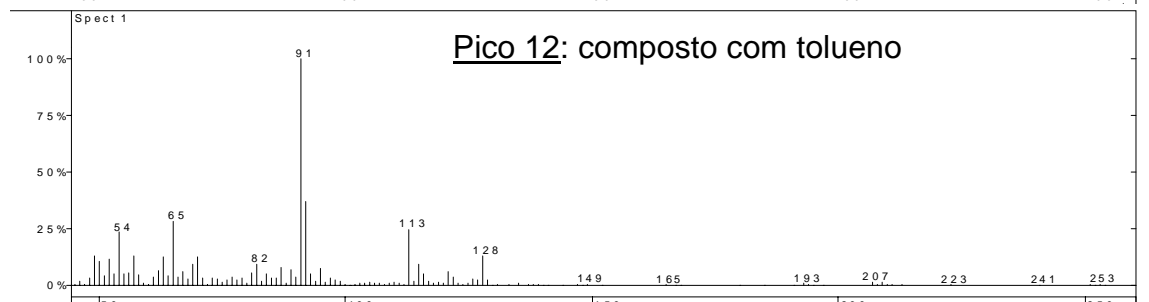
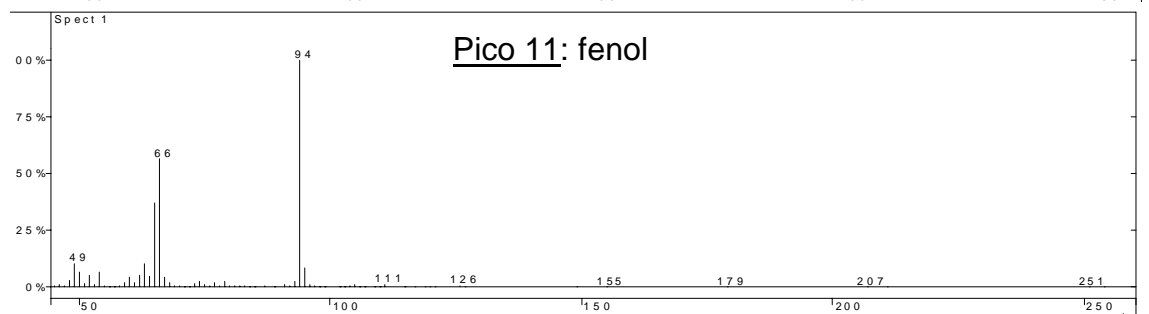
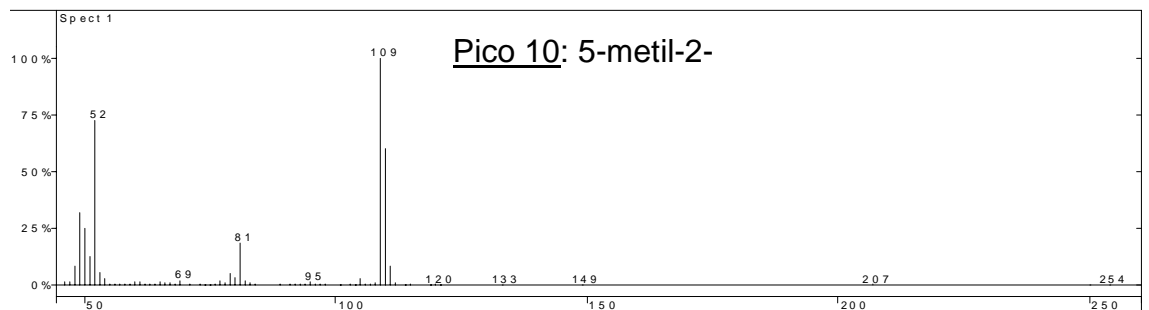
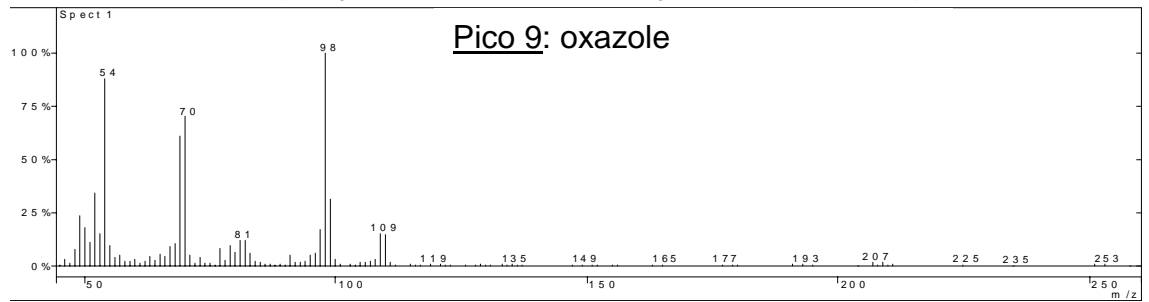
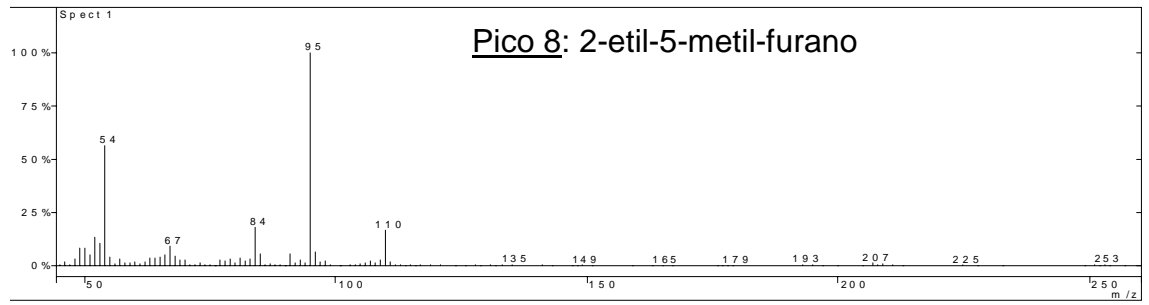
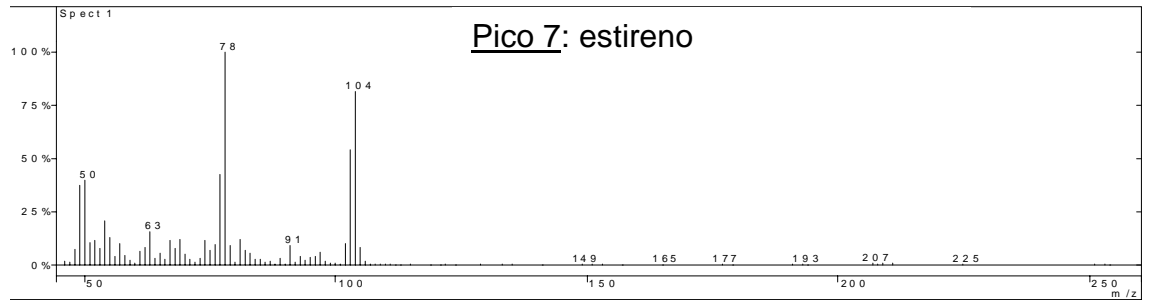
Apêndice 25. Espectros de massa dos correspondentes picos obtidos por pirólise analítica.



continua ...

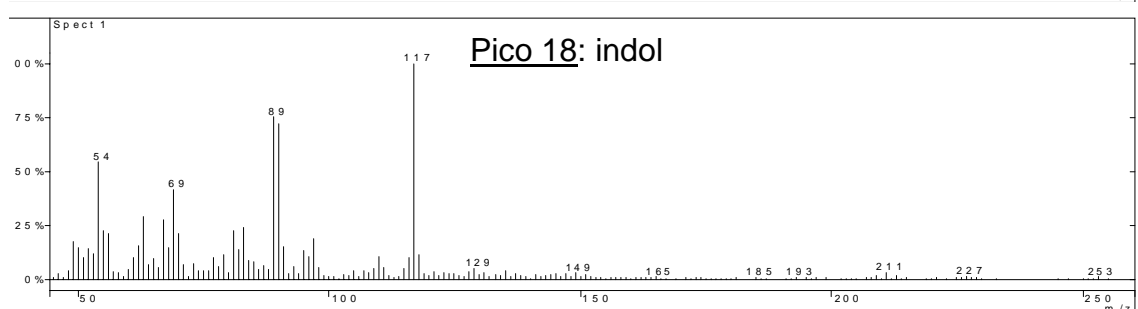
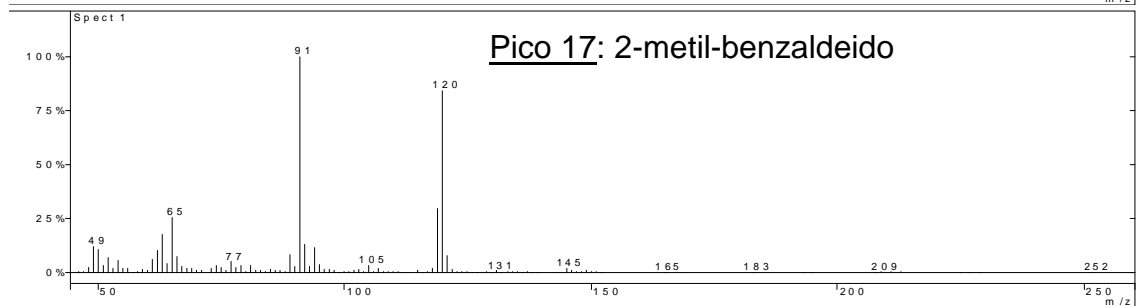
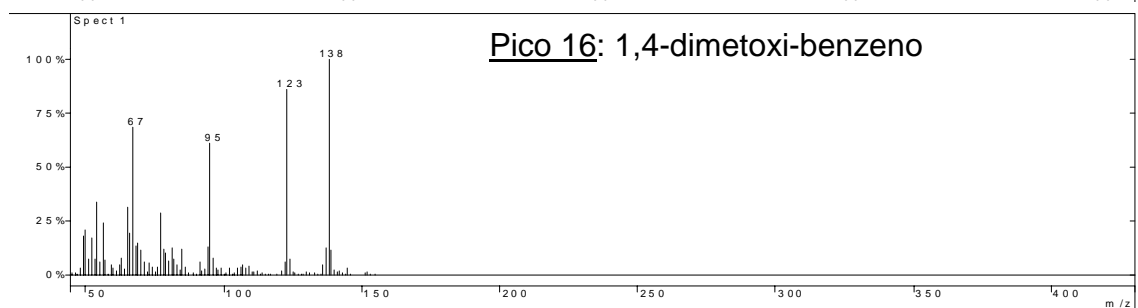
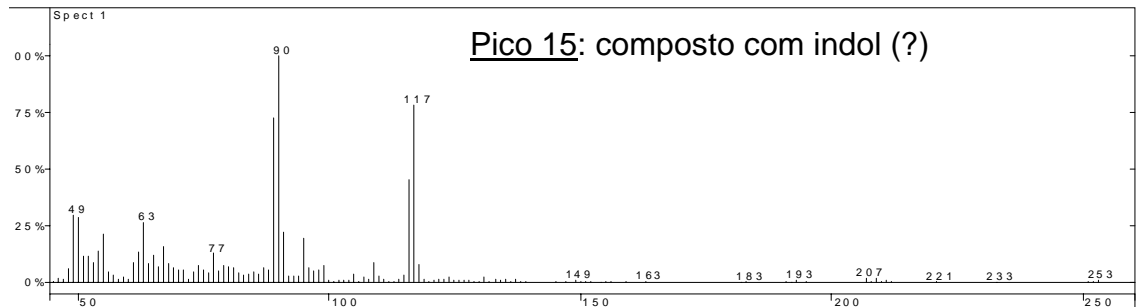
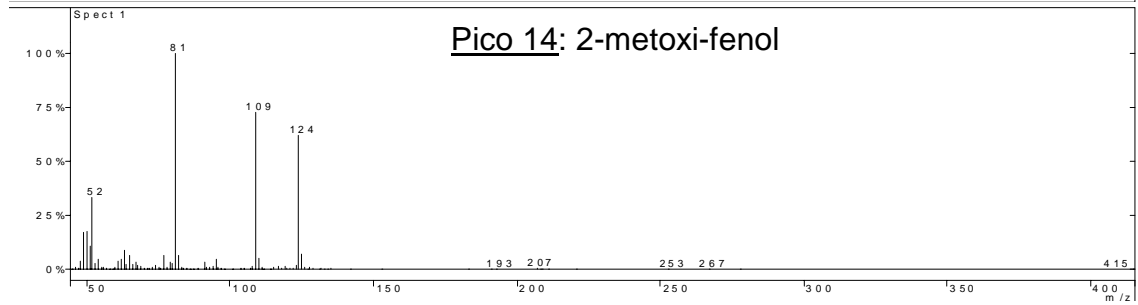
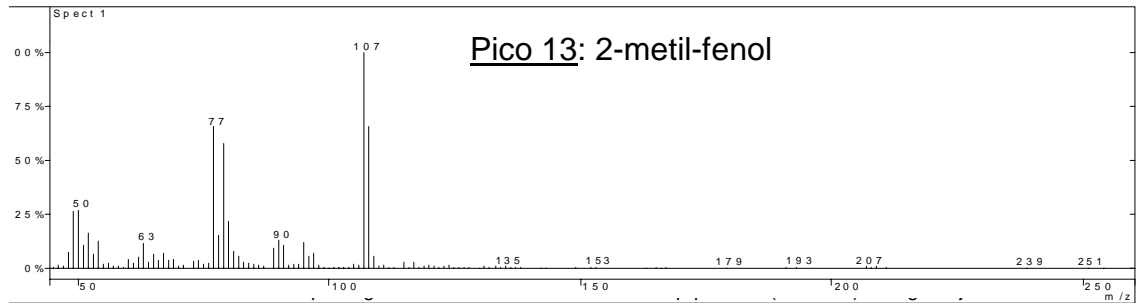


... continuação do Apêndice 25



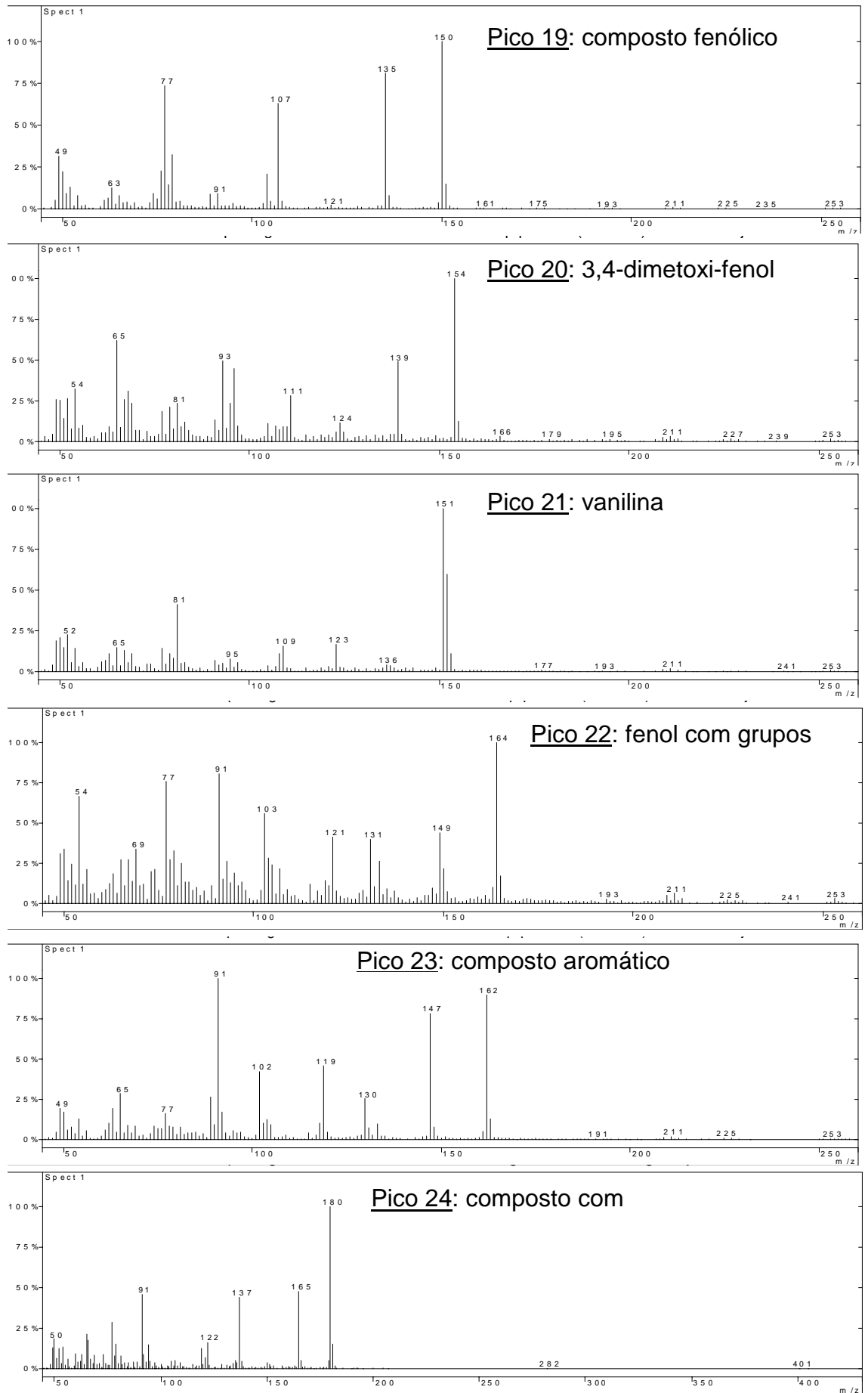
continua ...

... continuação do Apêndice 25



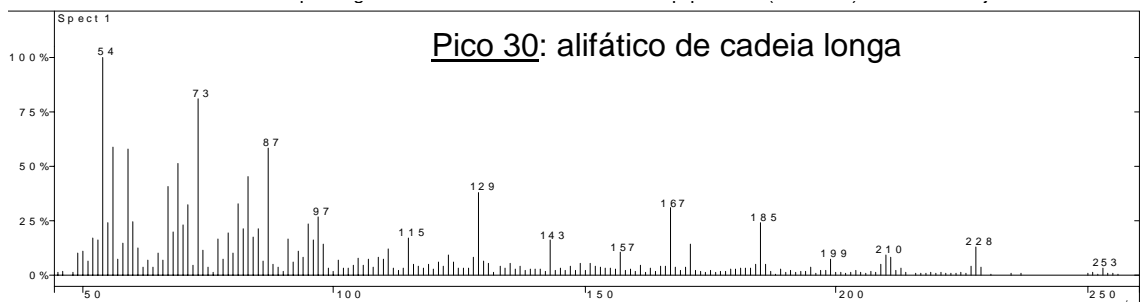
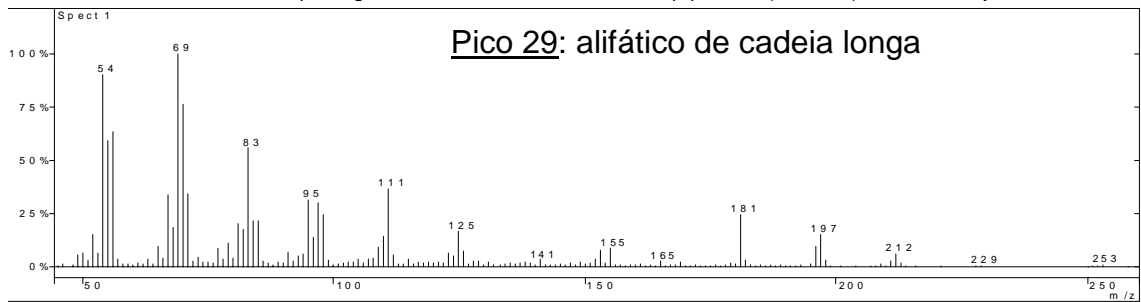
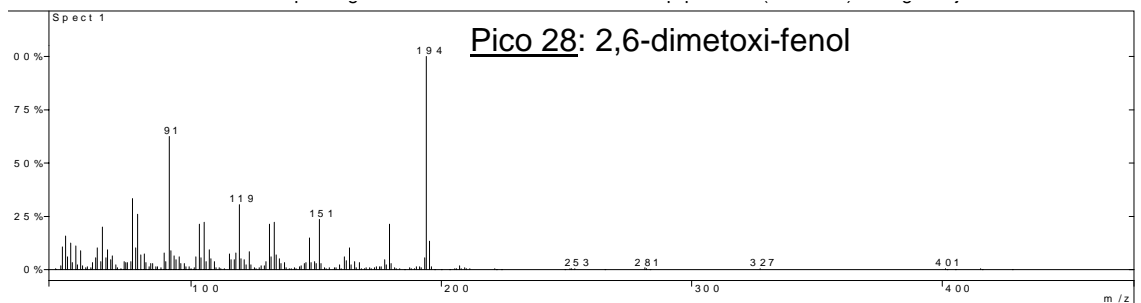
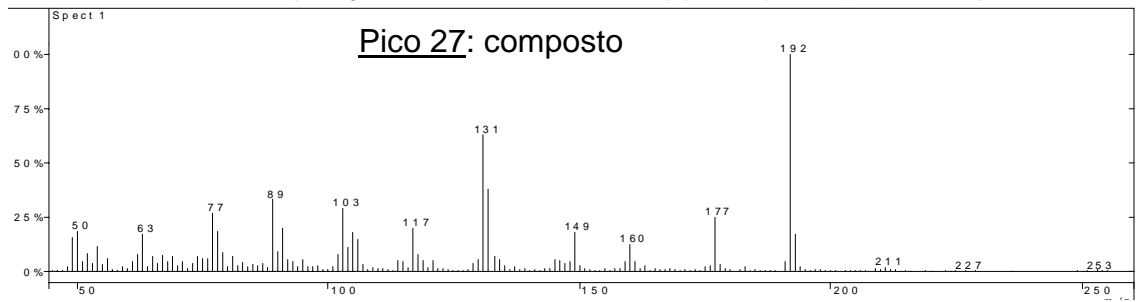
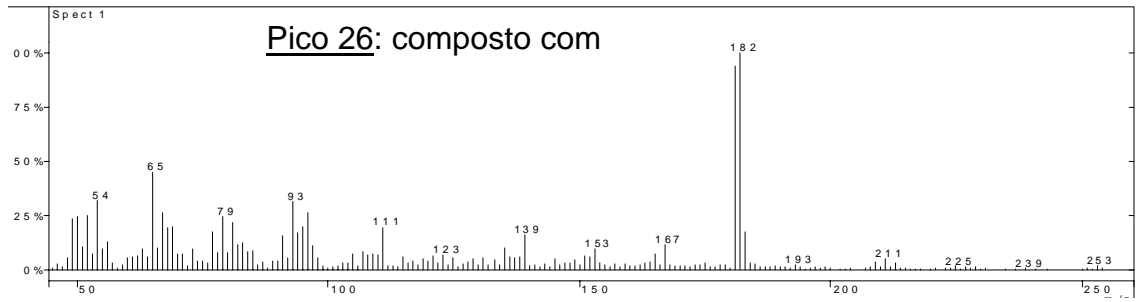
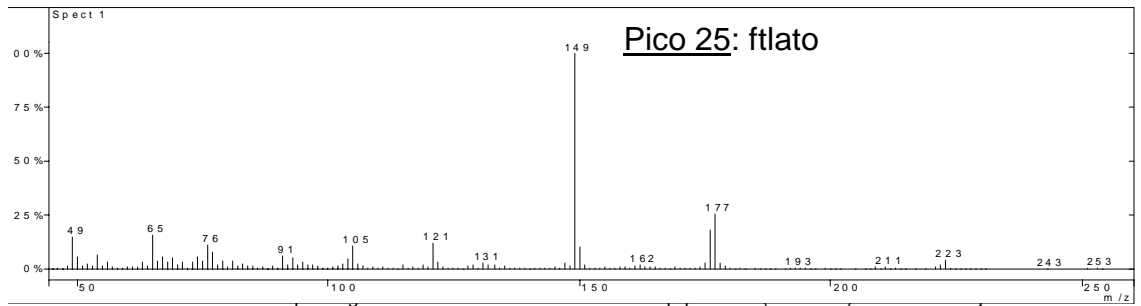
continua ...

... continuação do Apêndice 25



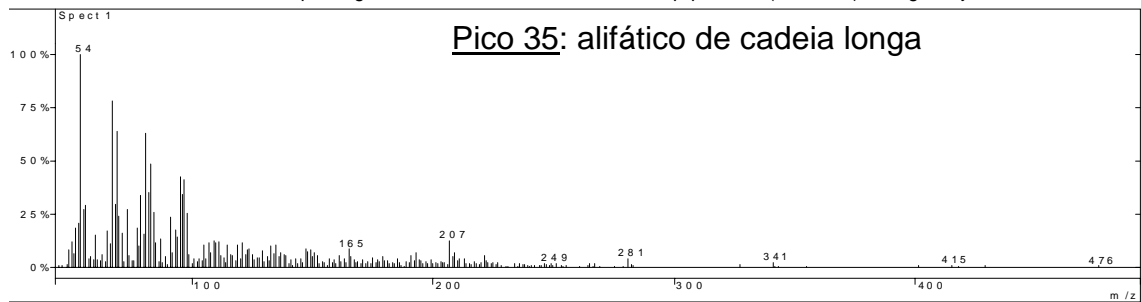
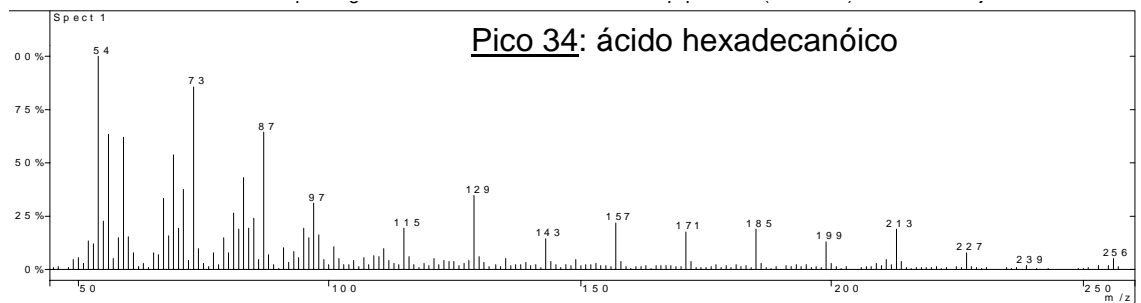
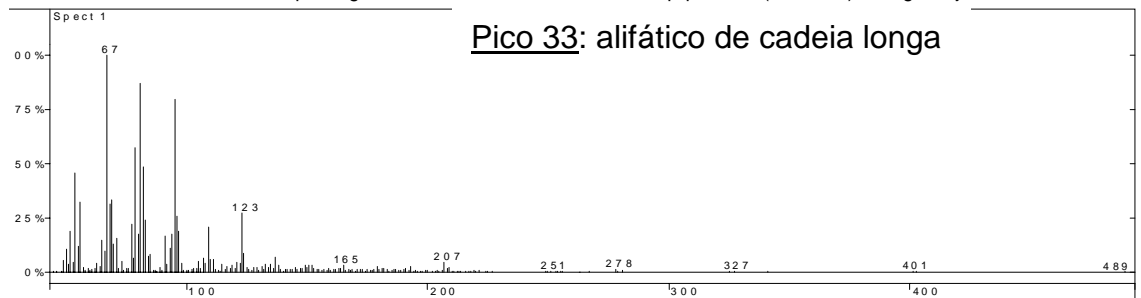
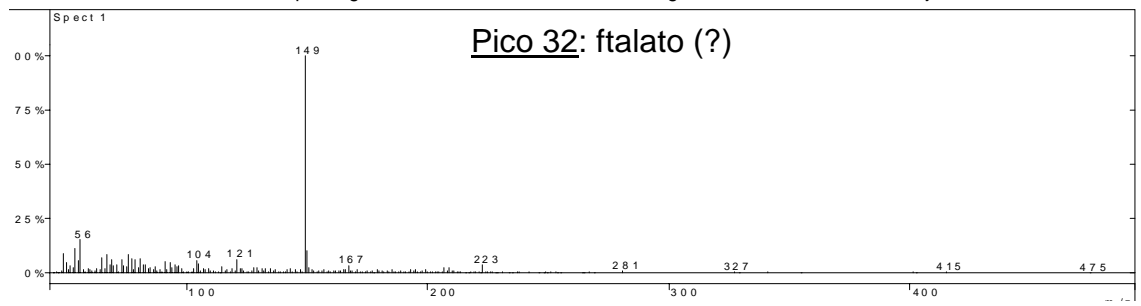
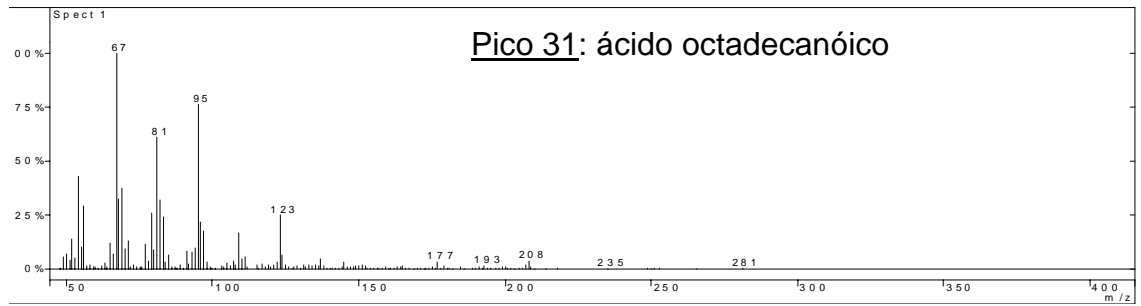
continua ...

... continuação do Apêndice 25



continua ...

... continuação do Apêndice 25



## 10. RESUMO BIOGRÁFICO

Jeferson Diekow, filho de Alfredo e Hedi Diekow, nasceu em 10 de agosto de 1974, em Ijuí (RS). Viveu a infância no interior de Catuípe (RS). Coursou as séries iniciais (1ª até a 4ª) na Escola Municipal Nossa Senhora da Salete, Santa Tereza, Catuípe (RS) e completou os estudos do primeiro grau na Escola Estadual Miguel Burnier, Coronel Barros, Ijuí (RS). Em 1989 ingressou no Instituto Municipal de Educação Rural Assis Brasil – “IMEAB”, formando-se Técnico em Agropecuária em 1992. No ano seguinte ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria - “UFSM”, graduando-se no ano de 1997. De março de 1998 a fevereiro de 2000, realizou o Curso de Mestrado em Ciência do Solo, na área de Química e Fertilidade do Solo, sob orientação do Prof. Egon J. Meurer, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – “UFRGS”. Em março de 2000 iniciou o curso de Doutorado, no mesmo Programa de Pós-Graduação, na área de Manejo do Solo, sob orientação do Prof. João Mielniczuk e co-orientação do Prof. Cimélio Bayer. Realizou parte de seu trabalho de doutorado junto ao Departamento de Solos da Universidade Técnica de Munique, Alemanha, sob supervisão da Dr. Heike Knicker, no período entre agosto de 2001 e março de 2002. É membro da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo e da International Humic Substances Society-Grupo Brasileiro.