

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

**ESTOQUE E LABILIDADE DO CARBONO EM FRAÇÕES DA
MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO AFETADOS POR
SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO**

JOSILÉIA ACORDI ZANATTA
Dissertação de Mestrado

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

**ESTOQUE E LABILIDADE DO CARBONO EM FRAÇÕES DA
MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO AFETADOS POR
SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO**

JOSILÉIA ACORDI ZANATTA
Engenheira Agrônoma (UDESC)

Dissertação apresentada como um dos requisitos à
obtenção do Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Janeiro de 2006

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO

Z27e

Zanatta, Josiléia Acordi

Estoque e labilidade do carbono em frações da matéria orgânica de um argissolo afetados por sistemas de manejo do solo / Josiléia Acordi Zanatta. — Porto Alegre : J.A.Zanatta, 2006.

xiv, 113f.; il.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

1. Manejo do solo : Sistema conservacionista : Matéria orgânica do solo : Estoque e labilidade de carbono orgânico. I.Título.

CDD: 631.51

CDU: 631.4

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

JOSILÉIA ACORDI ZANATTA
Engenheira Agrônoma - UDESC

DISSERTAÇÃO

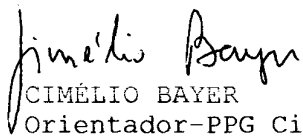
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

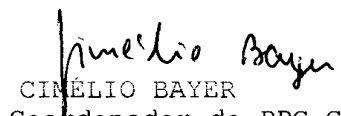
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

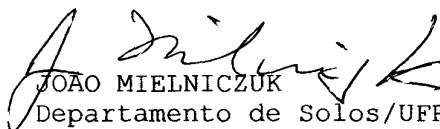
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil


Aprovada em: 27.01.2006
Pela Banca Examinadora

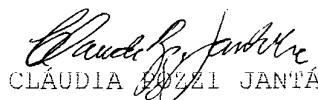
Homologada em: 25.07.2006
Por



CIMÉLIO BAYER
Orientador-PPG Ciência do Solo


CIMÉLIO BAYER
Coordenador do PPG Ciência
do Solo


JOÃO MIELNICZUK
Departamento de Solos/UFRGS


CLÊNIO NAILTO PILLON
EMBRAPA Clima Temperado


CLÁUDIA SUZZI JANTÁLIA
EMBRAPA Agrobiologia


GILMAR ARDUINO B MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*Dedico este trabalho ao meu querido avô,
cuja companhia não compartilho mais.
Porém, o afago nos cabelos e suas palavras de carinho
jamais esquecerei.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cimélio Bayer, pela sua dedicação e empenho em nossa orientação, pelo exemplo profissional e por ter sido sempre mais que um professor, um verdadeiro amigo.

Ao professor João, pelos sábios ensinamentos que nos transmite. Por nos contagiar com sua motivação nos dias de trabalho no campo. Pelo seu exemplo de vida, no qual procuramos nos espelhar.

Ao Departamento de Solos e ao PPG Ciência do solo juntamente com seus professores, pela formação acadêmica e pela oportunidade de ensino e pesquisa e ao CNPq, pela bolsa de Mestrado concedida.

À Pesquisadora Dra. Débora M.B.P.Milori, pela recepção na Embrapa Instrumentação Agropecuária, pelas sugestões valiosas para a qualidade deste trabalho e pelo tempo dedicado.

Aos amigos do PPG Ciência do Solo especialmente aos do grupo de manejo do solo, Frederico, Paulo César, Madalena, Nilvânia, Juliana, Elisandra Júlio, Gustavo, Pavinato e Carlos pelas discussões que possibilitaram o nosso crescimento em grupo e pelo convívio harmonioso, do qual muitas lembranças permanecerão vivas na memória, serei sempre grata a vocês.

Aos bolsistas de iniciação científica Eliane da Rosa Ávilas, Fernando Vieiro, Diego Guterres, Mateus Colares Terra, Tiago Soares Pedroso, pelos trabalhos que compartilhamos e pela amizade de vocês.

Aos funcionários Adão dos Santos, Luís Antônio da Silveira e José da Silva, pela boa vontade em nos ajudar em várias etapas do nosso curso.

Ao Jeferson, sempre presente, carinhoso e compreensivo, pelos inúmeros sonhos compartilhados, pelo estímulo e apoio nesta jornada, pelo exemplo de profissionalismo e pelas discussões e contribuições a este trabalho, é muito bom contar com você.

À meus pais e à minhas irmãs, pela acolhida calorosa em cada passeio em casa, pela compreensão da minha ausência em muitos momentos familiares importantes durante este percurso, vocês são o meu “porto seguro” quando a vida fica agitada como o mar em dia de tempestade.

Por fim, ao bondoso Deus, que colocou cada uma destas pessoas no caminho de nossa vida, e que todos os dias nos presenteia com novos aprendizados e saberes que fazem de nós pessoas melhores, minha gratidão.

ESTOQUE E LABILIDADE DO CARBONO EM FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO AFETADOS POR SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO¹

Autor: Eng. Agr. Josiléia Acordi Zanatta

Orientador: Prof. Cimélio Bayer

RESUMO

Os sistemas de manejo afetam o estoque e a labilidade da matéria orgânica do solo (MOS), com reflexos nos fluxos de energia e matéria e na qualidade de solos agrícolas. Este estudo objetivou avaliar o efeito de longo prazo (18 anos) da utilização de sistemas de preparo de solo [plantio direto (PD) e preparo convencional (PC)], sistemas de cultura [aveia/milho (A/M), vica/milho (V/M), e aveia+vica/milho+caupi (AV/MC)] e de doses de N mineral [0 kg N ha⁻¹ (0N) e 180 kg N ha⁻¹ (180N)], sobre o acúmulo e a labilidade do C em frações da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho da Depressão Central do RS. As taxas de acúmulo de C foram calculadas em relação ao sistema PC A/M 0N. A labilidade do C foi obtida pela relação entre o estoque de C da fração leve (densidade < 1,8 Mg m⁻³) e pesada (densidade > 1,8 Mg m⁻³) da MOS. As taxas anuais de acúmulo de C na camada 0-0,2 m do solo em PD variaram de 0,19 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no A/M 0N a 0,65 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no AV/MC 180N. Porém, a taxa de acúmulo de C do sistema AV/MC foi subestimada em aproximadamente 38% quando incluiu-se na avaliação camadas subsuperficiais de 0,2-1,0 m. A adubação nitrogenada, apesar de aumentar em 1,2 Mg ha⁻¹ o estoque de C no solo, quando considerados seus custos energéticos, não representou efetivamente seqüestro de C no solo. O índice de manejo de carbono (IMC), utilizado para avaliar a qualidade de sistemas de manejo de solo e calculado através de alterações que os sistemas promovem sobre o estoque e a labilidade do C em relação a um sistema de referência, foi maior no PD do que em PC e apresentou uma estreita relação com a adição de C ao solo ($r = 0,81$ a $0,96$; $P < 0,05-0,10$) e com propriedades físicas, químicas e biológicas do solo ($r = 0,73$ a $0,99$; $P < 0,05$ a $0,01$). O carbono extraível em água (<0.45 μm) apresentou relação com o estoque de C no solo. A recalcitrância da matéria orgânica dissolvida, avaliada por espectroscopia de fluorescência e UV-Vis, foi menor em PD do que em PC e apresentou relação com a recalcitrância da MOS determinada por espectroscopia de fluorescência induzida por laser em amostras de solo inteiro.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (113p.) Janeiro, 2006. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

ACCUMULATION AND LABILITY OF C IN SOIL ORGANIC MATTER FRACTIONS OF A SUBTROPICAL ACRISOL AS AFFECTED LONG-TERM BY MANAGEMENT SYSTEMS²

Author: Jossiléia Acordi Zanatta

Adviser: Prof. Cimélio Bayer

ABSTRACT

Soil management systems affect the stock and lability of soil organic matter (SOM), and therefore the matter and energy fluxes that determine soil quality. This study aimed at assessing the effect of long-term (18-years) tillage systems [no-till (NT) and conventional tillage (CT)], cropping systems [oat/maize (O/M), vetch/maize (V/M) and oat+vetch/maize+cowpea (OV/MC)] and N fertilization [0 kg N ha⁻¹ (0N) and 180 kg N ha⁻¹ (180N)] over the accumulation and lability of C in SOM fractions of a subtropical Acrisol. To compute the C accumulation, the CT O/M 0N system was taken as reference. The C lability was given by the ratio between the stock of light (density <1.8 Mg m⁻³) and heavy C (density >1.8 Mg m⁻³). The annual C accumulation rate in the 0-0,2m layer of no-till soil varied from 0.19 Mg C ha⁻¹ year⁻¹, in O/M 0N, to 0.65 Mg C ha⁻¹ year⁻¹, in OV/MC 180N. These C accumulation rates, however, underestimated in average at 38% the rates obtained when the 0-1,0 m layer was considered. The N fertilization increased the soil C stocks at an average value of 1,2 Mg ha⁻¹, but when the energy costs related to fertilizer production was considered, this practice did not represent an efficient strategy to atmospheric C mitigation. The carbon management index (CMI), used to assess the quality of the management system and calculated from changes that this system implies on C stocks and lability, was higher in NT than in CT and showed a close relation to C addition ($r = 0.81$ to 0.96 ; $P < 0.05-0.10$) and physical, chemical and biological soil properties ($r = 0.73$ to 0.99 ; $P < 0.05$ to 0.01). The water extractable organic carbon (<0.45 μ m) showed a relation with total C stocks and its recalcitrance, assessed through fluorescence and UV-Visible spectroscopy, was lower in NT than in CT and showed correlation with SOM recalcitrance determined through laser-induced fluorescence spectroscopy of the whole soil.

² Master of Science Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (113p.) January, 2006. Research supported by CNPq.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Importância do C orgânico do solo	3
2.2. Alterações no estoque de C do solo promovidas pelos sistemas de manejo de solo	4
2.3. Frações da matéria orgânica do solo	7
2.3.1. Dinâmica do C orgânico do solo em frações físicas da MOS	7
2.3.2. Alterações no estoque de C das frações físicas da MOS promovidas pelos sistemas de manejo de solo	9
2.3.2.1. O fracionamento físico do C orgânico do solo	10
2.3.2.2. O índice de manejo de C dos sistemas de manejo	11
2.3.3. Dinâmica do C na solução do solo	13
2.3.4. Influência do manejo do solo no COEA	14
2.3.4.1. Análises espectroscópicas da matéria orgânica dissolvida (MOD)	15
a) Espectroscopia de fluorescência	16
b) Espectroscopia na região do ultravioleta-visível (UV-Vis)	18
3. HIPÓTESES E OBJETIVOS GERAIS	20
3.1. Hipóteses	20
3.2. Objetivos	20
4. MATERIAL E MÉTODOS GERAIS	21
4.1. Localização e caracterização edafo-climática	21
4.2. Descrição dos tratamentos e condução do experimento	22
4.3. Amostragem do solo	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1. ESTUDO I Acúmulo de C no solo e os custos em C equivalente relacionados aos sistema de preparo, sistemas de cultura e adubação nitrogenada	25
5.1.1. Introdução	25
5.1.2. Material e Métodos	27
5.1.2.1. Experimento de campo e coleta de amostra de solo	27
5.1.2.2. Tratamentos e camadas de solo avaliadas	28
5.1.2.3. Estimativa da adição de C ao solo	28
5.1.2.4. Determinação e cálculo dos estoques de C orgânico do solo.....	28
5.1.2.5. Estimativa do seqüestro de C no solo	29

5.2.1.6. Análise estatística	29
5.1.3. Resultados e discussão	30
5.1.3.1. Adição de C pelas culturas	30
5.1.3.2. Teores e estoques de C orgânico do solo	32
5.1.3.3. Estimativas do seqüestro de C no solo	38
5.1.3.4. Acúmulo de C em subsuperfície	41
5.1.4. Conclusões	43
5.2. ESTUDO II Estoque de C na fração leve da MOS, labilidade do C e qualidade de sistemas de manejo do solo avaliada pelo índice de manejo de carbono	45
5.2.1. Introdução	45
5.2.2. Material e Métodos	48
5.2.2.1. Experimento de campo e coleta de amostra de solo	48
5.2.2.2. Tratamentos e camadas de solo avaliadas	48
5.2.2.3. Fracionamento físico e análise de C	48
5.2.2.4. Cálculo do IMC	49
5.2.2.5. Análise estatística	49
5.2.3. Resultados e discussão	49
5.2.3.1. Índice de estoque de C	49
5.2.3.2. Labilidade e índice de labilidade do C	53
5.2.3.3. Índice de manejo de carbono	56
5.2.4. Conclusões	57
5.3. ESTUDO III Carbono orgânico extraível em água e características espectroscópicas da matéria orgânica dissolvida em sistemas de manejo de solo	59
5.3.1. Introdução	59
5.3.2. Material e Métodos	62
5.3.2.1. Experimento de campo e coleta de amostra de solo	62
5.3.2.2. Tratamentos e camadas de solo avaliadas	62
5.3.2.3. Fluorescência induzida por laser em amostras de solo inteiro	62
5.3.2.4. Extração da MOD e determinação do COEA	63
5.3.2.5. Espectroscopia de fluorescência e na região do ultravioleta- visível na MOD	63
5.3.2.6. Análise estatística	64
5.3.3. Resultados e discussão	64
5.3.3.1. Teores e estoques de C orgânico extraível em água	64
5.3.3.2. Caracterização da MOD por espectroscopia	67
5.3.4. Conclusões	76
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
8. APÊNDICES	91

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Base de cálculo dos custos em carbono equivalente (CE) para a execução de práticas de manejo e processos industriais de insumos utilizados na agricultura.....	30
2. Teores e estoques de C orgânico nas camadas de 0-0,3 m de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo por 18 anos	33
3. Estoques e teores de C orgânico total e da fração leve da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo do solo durante 18 anos	50
4. Índice de estoque de C (IEC), labilidade (L), índice de labilidade do C (ILC) e índice de manejo do C (IMC) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo sob campo nativo e submetido a diferentes sistemas de manejo.....	51
5. Correlação entre o índice de manejo de C (IMC) e propriedades do solo	57
6. Teores e estoques de C orgânico extraível em água (COEA) de um Argissolo submetido a sistemas de manejo do solo durante 18 anos	65
7. Índice de recalcitrância (IR) da matéria orgânica do solo (MOS) por fluorescência induzida por laser (FIL) em solo inteiro e por análise espectroscópica da matéria orgânica dissolvida (MOD) ..	68
8. Relação entre as metodologias utilizadas para determinação do índice de recalcitrância da MOD.....	75

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
<p>1. Carbono adicionado pelas plantas de cobertura (aveia, vica e caupi) e pelo milho em Argissolo Vermelho, em diferentes sistemas de culturas (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) e dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹). Média de 18 anos, dois sistemas de preparo do solo e três repetições.....</p>	31
<p>2. Relação entre o C adicionado ao solo anualmente (média de 18 anos) por sistemas de cultura (culturas cobertura+milho) em duas doses de N mineral e a variação do C orgânico no solo no tempo (dC/dt) em relação ao estoque no início do experimento. PC: preparo convencional; PD: plantio direto. 1 – A/M 0 kg N ha⁻¹, 2 – V/M 0 kg N ha⁻¹ e 3 – AV/MC 0 kg N ha⁻¹, 4 – A/M 180 kg N ha⁻¹, 5 – V/M 180 kg N ha⁻¹ e 6 – AV/MC 180 kg N ha⁻¹. (A: aveia, V: vica, M: milho, C: caupi).....</p>	34
<p>3. Evolução dos estoques de carbono (a) e estimativa das respectivas taxas de acúmulo de C em relação ao sistema PC A/M 0N (b) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) na ausência de N mineral. ¹ Freitas et al. (1996), ² Bayer & Mielniczuk (1997), ³ Bayer et al. (2000a) e ⁴ Lovato et al. (2004).....</p>	37
<p>4. Taxa de acúmulo de C orgânico no solo (a), custos em carbono equivalente (CE) (b) e seqüestro de carbono no solo (c), na camada de 0-0,2 m, num experimento conduzido há 18 anos em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), sob três sistemas de culturas (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) e duas doses de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹). * referência: PC A/M 0 kg N ha⁻¹.....</p>	39
<p>5. Teor e estoque de carbono orgânico total nas camada de 0-0,2 e 0-1,0m de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo extremos quanto à adição de massa seca ao solo. * 5% de significância pelo teste de Tukey.....</p>	42

6.	Relação entre o C adicionado anualmente pelos sistemas de cultura e o Índice de estoque de carbono: IEC (a) índice de labilidade do carbono: ILC (b) e índice de manejo do carbono: IMC (c) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo submetido a sistemas de manejo do solo (PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) em duas doses de N (0 e 180 kg ha ⁻¹). 1: aveia+milho 0 kg N ha ⁻¹ ; 2: aveia /milho 180 kg N ha ⁻¹ ; 3: aveia+vica/milho+caupi 0 kg N ha ⁻¹ e 4:aveia+vica/milho+caupi 180 kg N ha ⁻¹	52
7.	Labilidade do C nas camadas de um Argissolo Vermelho conduzido à 18 anos sob diferentes sistemas de preparo e de culturas em duas doses de N mineral (0 e 180 kg N ha ⁻¹). PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi. Letras maiúsculas comparam sistemas de preparo do solo dentro do mesmo sistemas de cultura e dose de N e as letras minúsculas comparam sistemas de cultura dentro do mesmo sistemas de preparo e dose de N, através do teste de Tukey a 5%	54
8.	Efeito da adição de C ao solo sobre o estoque de C orgânico do solo (a) e do estoque de C orgânico do solo sobre o conteúdo de carbono orgânico extraível em água (b) no solo em PC (preparo convencional) e PD (plantio direto). A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi..	66
9.	Relação do índice de recalcitrância obtido por fluorescência induzida por laser (FIL) em amostras de solo inteiro e por análise espectroscópica da MOD	69
10.	Espectros de emissão em 240 nm em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M:aveia/milho e AV/MC:aveia+vica/milho+caupi)	70
11.	Espectros de emissão em 465nm em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M:aveia/milho e AV/MC:aveia+vica/milho+caupi)	71
12.	Espectros de síncronos em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M:aveia/milho e AV/MC:aveia+vica/milho+caupi)	73

- 13.** Espectros de absorvância de luz ultravioleta-vísivel (UV-VIS) em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC; preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) 74

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Matéria seca e C adicionado pela parte aérea das plantas de cobertura (aveia, vica, caupi) em um Argissolo sob três sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional, PR: preparo reduzido, PD: plantio direto) e dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha ⁻¹), nos anos agrícolas de 1999 a 2004, na média de 1985 a 1998 e na média dos 20 anos de condução do experimento.....	92
2. Carbono adicionado pela parte aérea acrescido de 30% de contribuição do sistema radicular das culturas de inverno (aveia+vica) e de verão (milho+caupi) em um Argissolo cultivado em sistemas de preparo do solo e sistemas de cultura, manejados em dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha ⁻¹), por 18 anos.....	93
3. Valores médios anuais estimados de N adicionado ao solo, reciclado e retirado pelos sistemas de preparo do solo (PC: preparo do solo, PR: preparo reduzido, PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) na média de 18 anos de condução do experimento.....	94
4. Produtividade de grãos de milho (12,5% umidade), nos blocos I, II e III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral.....	95
5. Teores de carbono e nitrogênio, relação C:N e densidade do solo nas camadas do solo de cada tratamento avaliado.....	97
6. Teores de carbono na fração leve (FL) da MOS em sistemas de manejo de solo em duas repetições de laboratório e na média	101

7.	Teores de carbono total, C na fração leve e densidade do solo em área de campo nativo adjacente ao experimento	102
8.	Teores de carbono orgânico extraível em água e pH da matéria orgânica dissolvida nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado por 18 anos em sistemas de preparo do solo e sistemas de cultura	103
9.	Área do espectro e índice de recalcitrância da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida por laser em cada camada do solo e tratamento avaliado	104
10.	Teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) nos blocos I, II, III e na média de um Argissolo manejado sob sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral por 18 anos.....	105
11.	Teores de P nos blocos I, II, III e na média no solo manejado sob sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral	107
12.	Valores de alumínio (Al) trocável nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral	108
13.	Valores de pH água nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral	109
14.	Valores de pH SMP nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral.....	110
15.	Valores de acidez potencial (H+Al) nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral	111
16.	Valores de CTC efetiva nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral	112
17.	Valores de CTC pH 7,0 nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de cultura e doses de N mineral	113

1. INTRODUÇÃO GERAL

Estima-se que, a nível mundial, 2 bilhões de hectares estejam degradados em função do uso e manejo inadequados do solo, por fatores climáticos e pela agricultura extrativista (Lal, 1997). A degradação destas áreas normalmente está relacionada com a diminuição do teor de C orgânico e a perda da capacidade de resiliência do solo. Como consequência, verifica-se a queda do potencial produtivo das lavouras, uma maior demanda por fertilizantes químicos e uma contribuição expressiva para a emissão de CO₂ à atmosfera, entre outros prejuízos ambientais e econômicos.

Sistemas conservacionistas de manejo constituem-se a principal estratégia para a recuperação de solos degradados e podem também contribuir para o sequestro de C atmosférico e a mitigação do aquecimento global. No entanto, apesar do crescente número de trabalhos sobre sequestro de C no solo, alguns aspectos têm sido poucos avaliados ou desconsiderados, como a capacidade de acúmulo de C em camadas subsuperficiais e a existência de custos energéticos, computados na forma de CO₂ atmosférico, os quais muitas vezes podem superar o benefício ambiental da prática de manejo.

Em adição aos estudos de estoque de C orgânico do solo, é importante avaliar a influência dos sistemas de manejo de solo em diferentes frações da matéria orgânica do solo (MOS). As alterações na dinâmica do C orgânico em frações da MOS promovidas pelos sistemas de manejo são importantes pelas diferentes funções exercidas pelas frações no solo, e também por apresentarem estabilidade distinta, sendo sensíveis para avaliar a qualidade de sistemas de manejo do solo a curto prazo. Ainda, o efeito de sistemas de manejo sobre as frações altamente reativas como a matéria orgânica dissolvida (MOD), a qual está envolvida em vários processos químicos e biológicos importantes no solo, como o transporte de metais

pesados e poluentes e a emissão de gases do efeito estufa, é pouco conhecido em solos tropicais e subtropicais.

Neste contexto, objetivou-se estimar o potencial de retenção de C no solo por sistemas conservacionistas de manejo e avaliar as alterações promovidas por estes no estoque e na labilidade do C orgânico, como indicadores da qualidade dos sistemas de manejo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância do C orgânico do solo

O solo é um componente essencial do ciclo global do C na biosfera, funcionando como um regulador do ciclo do C no ambiente terrestre. O C orgânico participa em diversos processos químicos, físicos e biológicos do solo, os quais regulam a produtividade das culturas e influenciam na qualidade do ambiente e do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997; Lal, 1997; Amado et al., 2001).

O conceito de qualidade do solo foi definido por Doran e Parkin (1994) como a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e de animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e do homem. Neste sentido, Doran e Zeiss (2000) identificaram a qualidade do solo como a base para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável e para a qualidade do ambiente.

A utilização do C orgânico do solo como um indicador de qualidade do solo foi proposta inicialmente por Larson & Pierce (1994). Os autores argumentam que a sensibilidade do C orgânico do solo às práticas de manejo, a acessibilidade à metodologia de avaliação e a interação existente entre os subsistemas do solo, evidenciados pela influência do C orgânico na agregação e estrutura do solo (Conceição et al., 2004), na disponibilidade de nutrientes às culturas (Bayer & Mielniczuk, 1997) e na atividade biológica de microrganismos do solo (Cattelan & Vidor, 1990), sustentam-no como um excelente indicador de qualidade do solo. A sensibilidade do C orgânico do solo às práticas de manejo pode ser observada por inúmeros trabalhos que discorrem sobre alterações nos estoques de C orgânico do solo (Mann, 1986; Monreal & Janzen, 1993 e Diekow et al., 2005a).

O estoque de C armazenado na forma de matéria orgânica do solo também pode desempenhar um papel relevante no seqüestro de C atmosférico e, conseqüentemente, contribuir para a mitigação do efeito estufa. Sistemas conservacionistas que aumentam o aporte de resíduos vegetais ao solo e que diminuem a mineralização da MOS são eficientes no seqüestro de C (Amado et al., 2001; Lovato et al., 2004). Na literatura são citadas diversas práticas de manejo que podem aumentar o estoque de C orgânico do solo, tais como: menor revolvimento do solo, rotação de culturas, fertilização química, irrigação, reflorestamento entre outras (Lal et al., 1999; Follet, 2001). Sob sistema PD Bayer et al. (2006a), efetuando-se uma síntese de resultados observaram taxas de seqüestro de C no solo que variaram de 0,19 a 0,81 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ na região subtropical. Estas taxas foram comparáveis as reportadas por Lal et al. (1999) e West & Marland (2002) também em solos cultivados em PD (0,24-0,40 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) na região temperada.

Por outro lado, as práticas de manejo capazes de aumentar a produção de resíduos vegetais e o C orgânico do solo podem envolver custos energéticos, os quais podem ser expressos em C equivalente (CE). Estes custos devem ser considerados na estimativa do benefício ambiental da prática de manejo para o seqüestro de C (West & Marland, 2002; Lal, 2004a). Schlesinger (1999, 2000) salienta que muitas práticas de manejo que aumentam o estoque de C orgânico podem não contribuir efetivamente para o seqüestro de C, pois a emissão de gases do efeito estufa ligadas a produtos ou tecnologia dessas práticas de manejo podem superar os aumentos no estoque de C orgânico do solo. Em adição, o efeito dos sistemas de manejo na emissão de outros gases do efeito estufa além do CO₂, como o CH₄ e N₂O também devem ser considerados.

2.2. Alterações no estoque de C orgânico promovidas pelos sistemas de manejo de solo

O solo é formado por subsistemas abertos representados pelas plantas, microrganismos e matéria mineral, os quais são relacionados e estão em constante troca de matéria e energia entre si. Os fatores que interferem nos subsistemas aumentam ou diminuem os fluxos de matéria e energia no solo,

refletindo diretamente nos estoques de C orgânico e no nível de organização deste sistema (Vezzani, 2001).

O estoque de C orgânico do solo no tempo pode ser estimado pelo modelo unicompartmental proposto por Henin & Dupuis (1945) e Woodruff (1949), cuja equação é expressa por $C_t = C_0 e^{-k_2t} + k_1A/k_2(1-e^{-k_2t})$. Essa equação pode ser dividida em duas expressões, a primeira representando o estoque de C original remanescente ou carbono “velho” ($C_0 e^{-k_2t}$), onde o termo C_0 representa o estoque original de C no $t=0$ e e^{-k_2t} o decaimento exponencial desse estoque ao longo do tempo. A segunda expressão representa o estoque de C adicionado pelas culturas ou carbono “novo” ($k_1A/k_2(1-e^{-k_2t})$), o qual acumula gradativamente no solo, onde o termo A refere-se a adição anual de C pelas culturas e k_1 e k_2 , a taxa anual de incorporação do C adicionado ao C orgânico do solo (coeficiente de humificação) e a taxa anual de perda de C orgânico do solo, respectivamente. A variação anual do estoque de C orgânico no solo é obtida pela derivação da equação descrita para o modelo unicompartmental, $dC/dt = k_1A - k_2C$.

Por essa equação, verifica-se que a variação do C orgânico no tempo (dC/dt) é dependente da quantidade de material orgânico adicionado ao solo (A , $Mg\ ha^{-1}$), do coeficiente de humificação (k_1 , % anual), do estoque atual de C orgânico ($Mg\ ha^{-1}$) e da taxa de perda de C (k_2 , % anual), principalmente por mineralização microbiana, erosão e lixiviação. Quando as quantidades anuais adicionadas e perdidas são iguais, a variação no estoque de C orgânico é nula e, assim, o estoque de C orgânico no solo encontra-se estável (C_e) ao longo do tempo ($C_e = k_1A/k_2$).

A determinação dos parâmetros desta equação podem ser obtidos pela interpretação de experimentos de campo (Bayer et al., 2006b) e/ou técnicas isotópicas (Balesdent et al., 1987; Collins et al., 1999), permitindo estimativas do tempo de meia vida do C original do solo ($t_{1/2} = \ln 2/k_2$) e o tempo médio de permanência do C novo no solo ($TMP = 1/k_2$), os quais estão diretamente relacionados aos sistemas de manejo de solo.

Os sistemas de preparo do solo influenciam principalmente as taxas de perdas de C orgânico do solo. O sistema plantio direto por promover uma menor mobilização do solo, minimiza a taxa de mineralização da MOS. Bayer et al. (2000a) determinaram, para um Argissolo Vermelho em plantio direto, um

k_2 cerca de duas vezes menor ao verificado no solo em preparo convencional. Desta forma, pode ocorrer acúmulo de C orgânico em solos cultivados em plantio direto se comparados ao cultivo do solo em preparo convencional (Blevins et al., 1983; Lovato et al., 2004). Porém, cabe salientar que o k_2 também depende da textura e mineralogia do solo, visto que em solos argilosos o mecanismo de proteção da MOS exercido por agregados do solo e óxidos de Fe e Al é mais evidente, em comparação a solos arenosos, minimizando as perdas de C orgânico (Silva et al., 1997; Bayer, 1996).

Por sua vez, os sistemas de culturas apresentam o seu efeito na dinâmica do C orgânico relacionado ao coeficiente de humificação e à adição de C ao solo, a qual abrange resíduos vegetais adicionados ao solo a exsudatos radiculares. O processo de humificação é intermediado por microrganismos do solo e assim está sujeito a influência do ambiente sobre a microbiota, além de ser afetado pela composição bioquímica do resíduo. As partes constituintes dos resíduos aportados ao solo (raízes, talos, folhas) apresentam diferentes coeficientes de humificação, os quais dão origem a um coeficiente médio. Gregorich et al. (1995) observaram k_1 médio de 12,2% ($k_1=0,122$) para resíduo de parte aérea das culturas, mas sabe-se que o k_1 das raízes apresenta valores bem superiores (17%) (Bolinder et al., 1999), devido ao maior teor de lignina e a localização na matrix do solo, favorecendo o processo de proteção física intragregados (Balesdent & Balabane, 1996).

Quanto a adição de C ao solo, várias espécies destacam-se pelo potencial de aporte de resíduos ao solo, sendo elas de importância econômica como o milho ou plantas de cobertura, com destaque para espécies de inverno (aveia preta - *Avena strigosa*, vicia - *Vicia sativa*, nabo forrageiro - *Raphanus sativus*, colza - *Brassica napus*) e de verão (caupi - *Vigna unguiculata*, lablab - *Lablab purpureum*, guandú - *Cajanus cajan*, milheto - *Pennisetum americanum*, Brachiaria - *Brachiaria decumbens*). A quantidade de resíduos adicionados ao solo também depende de outros fatores relacionados às práticas de manejo como a adubação e a calagem. Por exemplo, Testa (1989) determinou incrementos de 240 % na produção de fitomassa da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de 120 kg de N ha⁻¹.

Portanto, o estoque de C orgânico no solo é uma função de inúmeros fatores bióticos e abióticos que interagem entre si. As práticas de

manejo e as formas com que estas afetam a dinâmica do C orgânico são importantes componentes do sistema que devem ser conduzidos a fim de minimizar as perdas e maximizar a adição de C orgânico ao solo, permitindo incremento na qualidade do sistema solo.

2.3. Frações da matéria orgânica do solo

2.3.1. Dinâmica do C orgânico em frações físicas da MOS

A MOS é composta por compartimentos mais ou menos estáveis no solo. O caráter multicompartimental da MOS está relacionado à diversidade de seus componentes e as suas vias de transformação e estabilização (Andreux, 1996). A diversidade de critérios utilizados na separação das frações da MOS induz a definição de compartimentos que são operacionalmente (métodos químicos e físicos) e funcionalmente diferentes (tempo de permanência no solo). A separação do solo em frações de acordo com a função e a estrutura (fracionamento físico), permite um detalhamento maior quanto às alterações promovidas pelo manejo do solo na qualidade do C orgânico do solo.

Inicialmente, o C orgânico presente na MOS pode ser dividido em uma fração lábil (FLábil) e uma fração estável (FEstável). O C da FLábil é composto principalmente por substâncias de baixo peso molecular, materiais grosseiros, resíduos de plantas e animais em fase inicial de decomposição. Segundo Skjemstad et al. (1986), o C da FLábil possui elevados teores de carboidratos em sua constituição, os quais são fonte primária de matéria e energia para a biossíntese microbiana no solo, atuando na estabilização de macroagregados e na disponibilidade de nutrientes. Em regiões temperadas, o C da FLábil pode representar de 25 a 50% do C orgânico total (Cambardella & Elliot, 1992; Shang & Tiessen, 1997), porém é geralmente menor em regiões tropicais (Duxbury et al., 1989).

O C da FEstável refere-se a porção mais transformada do C orgânico do solo e representa a maior parte da MOS. Esta fração é representada por substâncias húmicas e outras macromoléculas orgânicas resistentes a decomposição microbiana. Estas estruturas possuem alto grau de polimerização, alta reatividade de superfície e elevado peso molecular. O C da

FEstável apresenta uma ciclagem mais lenta em relação ao C da FLábil e atua como reservatório de nutrientes e também na estabilização química dos microagregados do solo (Zech et al., 1997).

A estabilização do C da FLábil é relacionada principalmente à recalcitrância molecular e a proteção física da MOS. A recalcitrância molecular é função da composição química do material orgânico adicionado ao solo. Os principais compostos orgânicos do solo podem ser agrupados em carboidratos (celulose, hemi-celulose e amino açúcares), lignina, compostos protéicos (peptídios e aminoácidos) e lipídios. As estruturas aromáticas derivadas de lignina ou compostos humificados são mais resistentes à decomposição que as cadeias alifáticas de carboidratos, pois possuem uma forte energia de ligação no seu anel aromático.

A proteção física é uma ação de barreira física contra o ataque da população microbiana e suas enzimas sobre o C da FLábil. Os agregados do solo são os responsáveis pela proteção física da MOS. Dentro dos agregados, a menor difusão de oxigênio e a adsorção de enzimas na fração mineral, dificultam a ação direta da microbiota sobre a MOS, permitindo o armazenamento de fragmentos particulados de plantas, raízes e hifas fúngicas por mais tempo no solo. No entanto, quando os agregados são rompidos o mecanismo de proteção física da MOS é reduzido e o C da FLábil é exposto a ação dos microrganismos, acelerando a mineralização da MOS (Krull et al., 2003).

Por outro lado, o C da FEstável além da proteção física e recalcitrância molecular, apresenta-se associado à superfície de minerais do solo. Nesse caso, os microrganismos apesar do acesso direto ao composto orgânico, encontram dificuldade de romper as ligações da MOS com os grupos funcionais de superfície dos minerais. A formação de compostos organo-minerais confere ao C da FEstável uma estabilidade superior ao C da FLábil. Portanto, o C da FLábil, é mais sensível às mudanças no manejo do solo em relação ao C da FEstável. Em outras palavras pode-se dizer que as alterações no estoque de C da FLábil promovidas por mudanças no manejo são percebidas em curtos períodos de tempo, enquanto na FEstável, as alterações no estoque de C somente serão observadas no longo prazo (Janzen et al., 1992; Bremer et al., 1995).

2.3.2. Alterações no estoque de C das frações físicas da MOS promovidas pelos sistemas de manejo de solo

O acúmulo de C na FLábil depende das adições de C ao solo (Pillon, 2000; Bayer et al., 2001), do clima, das propriedades químicas e físicas que afetam a atividade dos organismos decompositores (Theng et al., 1989) e da magnitude da proteção física exercida pelos agregados do solo (Sollins et al., 1996; Baldock & Skjemstad, 2000). Sistemas com maior adição de C ao solo, promovem maior acúmulo de C, inicialmente na fração lábil e, com o tempo no solo inteiro. Diekow et al. (2005b), constataram que o maior estoque de C na FLábil foi obtida no sistema guandu+milho (G+M), enquanto o sistema solo descoberto (sem adição de resíduos vegetais), apresentou o menor estoque. Além da maior adição de C ao solo, o sistema G+M apresenta elevada proporção de compostos de lignina e celulose (Gomes, 2006 – dados não publicados). Estes compostos são de difícil decomposição pelos microrganismos do solo e determinam menores taxas de transformação do resíduo orgânico (Paustian et al., 1992).

A taxa de decomposição do C das frações da MOS também é influenciada pelo preparo do solo. Em estudos conduzidos no RS, Bayer (1996) obteve taxas de decomposição da FLábil da MOS em PC três vezes maiores do que as observadas em PD. Em adição, o autor observou acúmulo de 36% no estoque de C na FLábil da MOS em PD se comparado ao solo em PC. O manejo do solo em PD, além de minimizar a taxa de decomposição da MOS pelo ambiente menos oxidativo (Bayer et al., 2000a), intensifica o mecanismo de proteção física da MOS. Entretanto, outros fatores, além do manejo do solo, interferem na magnitude da proteção física, tais como a textura e a mineralogia.

O estoque de C da FEstável da MOS depende da quantidade de C da FLábil que é transformada pelos microrganismos no solo e da interação organo-mineral. Enquanto a interação organo-mineral tem relação com característica intrínsecas do solo, como mineralogia e textura, a passagem do C da FLábil para a FEstável é função da adição de resíduos vegetais ao solo. O material orgânico é transformado pela microbiota do solo e pode ficar protegido fisicamente por períodos variados, até passar para a FEstável da

MOS, onde ficará adsorvido quimicamente à superfícies minerais por ligações químicas.

Comparativamente, a FLábil é rapidamente alterada por mudanças no manejo do solo em relação a FEstável (Pillon, 2000; De Bona, 2005; Diekow et al., 2005b), devido principalmente a maior taxa de reciclagem dos constituintes orgânicos. Skjemstad et al. (1986), avaliando um solo da região de Queensland na Austrália, incorporado a área de produção agrícola a 35 anos, observaram que o estoque de C da FLábil foi reduzido em torno de 95%. Entretanto, o conteúdo de C da FEstável neste mesmo período não apresentou alterações significativas. Bremmer et al. (1995) estudando perdas de C orgânico pelo aumento da freqüência de pousio, obtiveram em termos relativos reduções do estoque de C orgânico da FLábil três vezes superior ao estoque de C orgânico do solo integral. No RS, Bayer et al. (2002a) observaram em 9 anos aumentos no estoque de C FLábil de 221% no solo em PD se comparado ao solo em PC, todavia, na FEstável a diferença entre os sistemas de manejo foi de 62%.

2.3.2.1. O fracionamento físico do C orgânico do solo

A obtenção e caracterização do C de frações da MOS tem empregado diferentes metodologias. Uma das técnicas mais difundidas é o fracionamento físico do carbono orgânico. O fracionamento físico é considerado uma técnica menos destrutiva e relacionada à função e à estrutura da MOS (Christensen, 1992). Os métodos de fracionamento físico podem ser densimétricos e granulométricos ou uma combinação de ambos. A escolha do método depende dos objetivos específicos do trabalho. Dependendo do método de fracionamento físico adotado, diferentes compartimentos de MOS serão obtidos (Roscoe et al., 2002).

O método granulométrico descrito por Cambardella & Elliot (1992) é empregado para separar o C associado aos minerais ($< 53 \mu\text{m}$), normalmente relacionado as frações silte e argila, e o carbono orgânico particulado ($> 53 \mu\text{m}$), material mais grosseiro, composto por resíduos orgânicos inicialmente decompostos. O método inclui dispersão do solo com hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), seguido pela separação das frações por peneira.

Com o método densimétrico é possível obter o C da fração leve da MOS (FL), por flotação em líquido com alta densidade específica (por exemplo, NaI ou politungstato Na com densidade $1,8 \text{ g cm}^{-3}$), precedido por dispersão do solo com ultra-som. O C da FL é predominantemente lábil, enquanto o C da fração pesada (FP) ($> 1,8 \text{ g cm}^{-3}$) encontra-se num estágio de decomposição avançado e em grande proporção associado a partículas minerais do solo.

O aumento da proporção de C particulado e/ou na FL reflete-se em aumento na labilidade do C do solo. O aumento da labilidade do C indica uma matéria orgânica de maior qualidade, devido a importância do C lábil nos fluxos de matéria e energia no solo. A labilidade, semelhantemente ao estoque de C orgânico, sofre influências da quantidade de resíduo aportada ao solo, do sistema de preparo adotado, das práticas de manejo empregadas e também do tipo de solo. Neste sentido, a labilidade da MOS é complementar na avaliação da qualidade dos sistemas de manejo do solo.

2.3.2.2. O índice de manejo de C dos sistemas de manejo

As alterações qualitativas e quantitativas no C orgânico do solo podem compor um índice de manejo de C, o qual é eficiente para prever a qualidade de sistemas de manejo do solo (Blair et al., 1995). Este índice utiliza uma condição de referência, para o qual é definido o IMC = 100. O sistema de referência pode ser uma área de vegetação natural (campo nativo ou mata), ou um solo degradado sob manejo inadequado.

O índice é obtido pelo produto entre um índice de estoque de C (IEC) e o índice de labilidade do C (ILC), como apresentado abaixo:

$$IMC = IEC \times ILC \times 100$$

onde:

IEC = estoque C do tratamento / estoque C da referência

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

L = estoque de C da fração leve / estoque de C da fração pesada

Originalmente, Blair et al. (1995) propuseram a utilização do índice baseado na labilidade obtida por oxidação química da MOS com permanganato de potássio 333 mmol L^{-1} , obtendo-se então uma fração oxidada, chamada de

matéria orgânica lábil e uma fração não oxidada, chamada de matéria orgânica não lábil. Porém, a oxidação da MOS exige a calibração de uma concentração de KMnO_4 para cada tipo de solo e o cuidado no manuseio do reagente à exposição a luz, o que possivelmente limitou a ampla adoção do IMC. O fracionamento físico do C foi proposto recentemente como uma alternativa para a determinação da labilidade do C (Diekow et al., 2005b), uma vez que permite a obtenção do C da fração leve ($>1,8 \text{ g cm}^{-3}$) ou particulada ($> 0,053 \text{ mm}$), os quais são componentes lábeis da MOS (Janzen et al., 1992). Estudos conduzidos por Vieira et al. (2004), correlacionaram o C lábil obtido pelo fracionamento físico densimétrico e granulométrico da MOS e o C lábil obtido pela oxidação química da MOS com KMnO_4 com resultados animadores. Porém, neste mesmo estudo, os autores verificaram que a concentração de permanganato de K adequada para oxidar a MOS seria de 60 mM, sendo que a concentração de 333 mM promoveu a oxidação de altos percentuais da MOS (16,8 a 42,3%), similar aos resultados obtidos por Shang & Tiessen (1997) (17 a 57%), e sugerindo que a utilização de concentrações menores de KMnO_4 sejam mais adequadas (Weil et al., 2003).

O índice de manejo de C permite definir a qualidade de sistemas de manejo e concluir sobre a direção do sistema solo à sustentabilidade ou à degradação. No estudo de Blair et al. (1995), a incorporação de áreas novas ao manejo agrícola determinou a redução do IMC, enquanto a inclusão de leguminosas promoveu aumentos significativos na qualidade do manejo. Diekow et al. (2005b) em um estudo sob plantio direto com diferentes sistemas de culturas e adubação nitrogenada, utilizando como referência um campo nativo de área adjacente ao experimento com índice 100, definiu o sistema com maior aporte de resíduos ao solo com maior IMC (256), enquanto o solo descoberto e o sistema aveia/milho sem N mineral, ambos com baixo aporte de resíduos vegetais foram inferiores a vegetação nativa (56). De Bona (2005) e Vieira et al. (2004) sob um Argissolo com sistemas de cultura, adubação nitrogenada e irrigação também definiram o IMC com coerência em relação aos tratamentos estudados. Entretanto, Salton (2005) em solos do Cerrado brasileiro, constatou a influência do clima sobre o C da fração lábil e do IMC, sendo importante considerar a época de amostragem na interpretação dos resultados e a relação do IMC com outras propriedades do solo.

2.3.3. Dinâmica do C na solução do solo

O C da solução do solo é definido como o C que passa por filtro 0,4 a 0,6 μm (Zsolnay, 1996). No solo, o C orgânico dissolvido (COD) está distribuído nos diferentes tamanhos de poros, desde macro a microporos. O COD de macroporos pode ser obtido pela centrifugação de amostras de solo indeformadas, enquanto o COD obtido de amostras deformadas, com agitação do solo em solução aquosa inclui além do COD presente em macroporos, o C dissolvido localizado em microporos e tem sido denominado de carbono orgânico extraível em água (COEA). A agitação do solo com água induz ao rompimento de agregados do solo, os quais contribuem para a quebra de células microbianas e a dessorção de material dissolvido da superfície de minerais. Portanto, o COEA é uma medida potencial do COD. Com base no exposto acima e na metodologia de extração do COD utilizada neste estudo, passaremos a utilizar a denominação COEA para a fração do C presente na solução do solo aqui discutida.

Apesar de representar uma fração pequena da matéria orgânica total, o COEA influencia a atividade biológica (Paul & Beauchamp, 1989), o transporte de metais pesados e poluentes (McCrea, 1986) e o intemperismo mineral dos solos (Raulund-Rasmussen et al., 1998). Estudos recentes têm dado enfoque para o COEA como substrato para a microbiota do solo e a sua interferência na emissão de gases do efeito estufa, principalmente CO_2 , em sistemas florestais e aquáticos (Sollins & Jandl, 1997; Glatzel et al., 2003). No entanto, poucas são as pesquisas relacionadas a dinâmica do COEA em solos agrícolas em ambientes tropicais e subtropicais (Chantigny, 2003).

O solo apresenta quantidades variadas de COEA, o qual é liberado pela solubilização da matéria orgânica estável, transformação de resíduos de plantas e animais, biomassa microbiana e exsudatos radiculares (Guggenberger et al., 1994; McDowell et al., 1998; Moore & Dalva, 20001). Há uma importante discussão na literatura a cerca da fonte principal de COEA (Kalbitz et al., 2000). Alguns autores creditam aos resíduos de plantas frescos a maior contribuição para o COEA (Moore & Dalva, 2001; Park et al., 2002). De acordo com estes autores, a maior quantidade de COEA ocorre no horizonte O, próximo de onde se concentram os resíduos vegetais senescentes, na

superfície do solo. Todavia, a contribuição da matéria orgânica estável, também é defendida por muitos pesquisadores (McDowell & Likens, 1988; Zsolnay, 1996). Os autores sugerem que a maior proporção de matéria orgânica estável no solo em relação ao C lábil, explicaria a maior contribuição desta fração para os teores de COEA.

A biomassa microbiana é também considerada uma fonte potencialmente importante de COEA, principalmente pela alta labilidade do C microbiano (Williams & Edwards, 1993). Estudos recentes com análise estrutural e fracionamento do COEA têm mostrado que uma significativa proporção do COEA é composta por metabólitos microbianos. De acordo com estes estudos, os carboidratos presentes no COEA são diferentes daqueles presentes nos resíduos de plantas e na matéria orgânica estável do solo, apresentando maior proporção de hexoses do que pentoses. Estas últimas são raramente encontradas em células microbianas (Guggenberger et al., 1994).

As raízes das plantas são freqüentemente associadas com elevados fluxos de COEA, devido a exsudação radicular (Vogt et al., 1983). Todavia, não há medidas diretas da contribuição das raízes para o COEA liberado no solo (Cheng et al., 1996). Apesar da grande divergência entre os pesquisadores, há consenso que as principais fontes de COEA são os resíduos de plantas e a matéria orgânica estável, principalmente pela representatividade destas fontes em relação aos exsudatos radiculares e à biomassa microbiana no solo.

2.3.4. Influência do manejo do solo no COEA

As pesquisas sobre as influências do manejo do solo sob o COEA são escassas e por vezes os resultados obtidos são contrastantes e não conclusivos. Em ambientes tropicais, praticamente inexistem estudos com COEA e, em regiões temperadas, concentram-se em solos de florestas e ambientes aquáticos.

As concentrações de COEA de solos de florestas normalmente são maiores se comparados a solos agrícolas. Numa síntese de resultados, Chantigny (2003) observou que os teores de COEA sob solos de florestas variaram de 1000 a 3000 mg L⁻¹, enquanto que em solos agrícolas, a variação foi de 5 a 900 mg L⁻¹. Estudos em áreas sob pastoreio também têm indicado

maiores concentrações em relação a solos cultivados (Flessa et al., 2000; Haynes et al., 2000). Normalmente, o que se observa é um progressivo declínio nos teores de COEA de solos de florestas incorporados ao cultivo agrícola. O declínio observado nos teores de COEA dos solos em sistema agrícola está provavelmente relacionado ao menor estoque de C orgânico do solo e a menor deposição de resíduos vegetais ao solo pelas plantas cultivadas.

O sistema de preparo do solo também influencia os teores de COEA. Linn & Doran (1984), compararam o conteúdo de COEA de solos em PD e PC e observaram que até a camada de 0,075 m o estoque de COEA foi maior no solo em PD, porém em camadas mais profundas não foram observadas diferenças significativas. Por outro lado, em cultivo de milho na camada de 0-0,2m, Gregorich et al. (2000), sob clima temperado obtiveram maior concentração de COEA quando os resíduos foram incorporados, sugerindo uma ativação da microbiota do solo e liberação de COEA. Dentre as plantas cultivadas, as leguminosas parecem aumentar os teores de COEA devido principalmente a intensa excreção de exsudatos radiculares, como sinalizadores da presença destas para a formação da simbiose com o rizóbio e a fixação biológica de N (Chantigny et al., 1997). Em adição aos efeitos observados no estoque de COEA, alterações qualitativas são também verificadas e relacionam-se com a intensidade de cultivo (Kalbitz, 2001; Leinweber et al., 2001) e com a quantidade e tipo de resíduos vegetais depositados no solo (Saviozzi et al., 1994; Delprat et al. 1997). A importância das alterações qualitativas do COEA, representando uma fração muito reativa da MOS, justifica o uso de técnicas espectroscópicas, as quais podem ajudar a elucidar a influência do manejo na qualidade da matéria orgânica dissolvida (MOD).

2.3.4.1. Análises espectroscópicas da matéria orgânica dissolvida (MOD)

As principais técnicas espectroscópicas utilizadas no estudo da MOS são: ressonância magnética nuclear do ^{13}C (RMN), ressonância paramagnética eletrônica (EPR), espectroscopia no ultravioleta-vísivel (UV-Vis), espectroscopia no infravermelho (IV) e fluorescência. Essas técnicas têm sido

aplicadas principalmente na detecção de alterações na qualidade da MOS por práticas de manejo (Ceretta, 1995, Bayer et al., 2000c, 2002b; Milori et al., 2002; González-Pérez et al., 2004; Dieckow et al., 2005;). Nesta revisão, abordar-se-á aspectos relacionados a espectroscopia de fluorescência e espectroscopia no UV-Vis, os quais foram utilizados neste estudo.

a) Espectroscopia de fluorescência

A aplicação da espectroscopia de fluorescência em estudos da MOS é recente (Milori et al., 2002; Milori et al., 2006). No entanto, tem surgido com grandes vantagens em relação as demais técnicas, principalmente pela facilidade de execução, baixo custo e maior sensibilidade. O fenômeno de fluorescência é baseado na emissão de luz quando o elétron excitado volta ao estado estável, liberando energia fluorescente. Numerosos grupos funcionais encontrados na MOS contribuem para a fluorescência: carboxilas, carbonilas, fenólicos, aminas entre outras estruturas policondensadas aromáticas e cromóforos conjugados. A intensidade de fluorescência é proporcional a presença dessas estruturas, as quais estão presentes em maior abundância em materiais orgânicos recalcitrantes (Miano & Senesi, 1992), fluorescendo em comprimentos de onda longo.

A determinação da recalcitrância da MOS pode ser realizada pela análise de fluorescência no solo inteiro ou em substâncias húmicas, obtidas por meio de técnicas de fracionamento químico da MOS. Entretanto, em estudos recentes, Park et al. (2002) e Cannavo et al. (2004) utilizaram a técnica para avaliar a qualidade da MOD e obtiveram resultados satisfatórios quanto ao grau de recalcitrância e algumas relações com o manejo do solo.

Atualmente, há três tipos principais de índices de recalcitrância obtidos através de espectros de fluorescência e aplicados originalmente no estudo de substâncias húmicas. Baseado em espectros de emissão, Zsolnay et al. (1999) propuseram um índice de recalcitrância de substâncias húmicas dissolvidas que é obtido pela divisão da área do último quarto (A_4) do espectro pela área do primeiro quarto (A_1) espectral. O espectro de emissão, neste caso, é obtido com excitação das moléculas no comprimento de onda de 240 nm e sua emissão é medida entre 300 e 650 nm. A idéia principal de Zsolnay e seus colaboradores é que as moléculas fluorescentes tornam-se mais condensadas,

deslocando o espectro de emissão para comprimentos de onda longos, e portanto, apresentam maiores valores de A_4/A_1 .

Milori et al. (2002) propuseram uma nova abordagem para os espectros de emissão. A partir de excitação em comprimento de onda maior (465 nm) do que o anterior (240 nm), a área sob o espectro de emissão foi diretamente relacionada a recalcitrância da MOS determinada por técnicas de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) em amostras de ácido húmicos. Enquanto o método proposto por Zsolnay usa excitação ultravioleta (240 nm), onde vários grupamentos da MOS são excitados, a proposta de Milori et al. (2002) exclui uma grande porção desses grupos mais lábeis, e portanto, é mais seletiva.

No método proposto por Kalbitz et al. (1999), o espectro de síncronos é medido numa variação de 220 a 650 nm. O espectro é obtido variando-se simultaneamente o comprimento de onda de emissão e de excitação, mantendo-se uma diferença entre eles de 55 nm. O espectro característico de síncronos em amostras de substâncias húmicas apresenta 2 picos principais em torno de 360 e 400 nm, com um ombro ao redor de 470 nm (Kalbitz et al., 1999). A intensidade destes picos tende a mudar dependendo da recalcitrância do material. Por isso, a relação entre picos de fluorescência em comprimentos de onda longa (I_{470nm}), e picos de fluorescência em comprimentos de onda curtos (I_{360nm} e I_{400nm}) foi proposta para avaliar aumento no grau de estruturas recalcitrantes policondensadas. O aumento desta relação é interpretada como um aumento na recalcitrância da MOS.

Com a utilização da fluorescência de emissão em amostras de MOD obtida de 98 solos, Cannavo et al. (2004), utilizando o índice A_4/A_1 , proposto por Zsolnay et al. (1999), observaram uma diminuição da recalcitrância da MOD no perfil do solo, reduzida por ocasião da incorporação do resíduo de milho fresco na camada de 0-0,2 m. Em camadas abaixo de 1,2 m o índice de recalcitrância da MOD manteve-se praticamente inalterado. Os estudos de Cannavo et al. (2004) também alertaram para as alterações ocasionadas por fatores climáticos. Em períodos chuvosos, a concentração de COEA na superfície do solo diminui, em contrapartida o índice de recalcitrância da MOD tende a aumentar. Possivelmente, o COEA é transferido para camadas mais profundas, concentrando na superfície do solo maior quantidade de estruturas

aromáticas policondensadas, as quais provavelmente encontram-se associadas em maior grau com a fração mineral do solo.

b) Espectroscopia na região do ultravioleta-visível (UV-Vis)

A espectroscopia de UV-Vis baseia-se nas transições eletrônicas, resultantes da absorção de luz pelas moléculas. As moléculas excitadas nos comprimentos de onda correspondentes ao ultravioleta (200-400 nm) e ao visível (400-800 nm), absorvem um quantum de energia, o qual é necessário para transferir um elétron do orbital em estado fundamental para um orbital de maior energia. Esta absorção de energia é medida na forma de absorbância ou transmitância (Ceretta et al., 1999). A absorção de energia no UV-Vis deve-se a presença de grupos de átomos com ligações insaturadas, chamados comumente de cromóforos. Quanto maior a proporção desses grupamentos maior será a absorção de energia, a qual decaí de forma característica com o aumento do comprimento de onda.

Por apresentar uma relação estreita com a composição elementar, a absorção no UV-Vis pode identificar diferentes condições de manejo nos solos. Segundo Kononova (1966), a razão entre a absorbância em 465 e 665 nm (E_4/E_6), pode refletir a magnitude do grau de condensação da MOS, uma vez que apresenta relação direta com o tamanho e o peso das estruturas (Chen et al., 1977). Martin-Neto et al. (1991) também verificaram alta correlação entre os resultados obtidos por EPR e a razão E_4/E_6 em substâncias húmicas. Em relação ao manejo do solo, Ceretta (1995) constatou que sistemas de manejo com maior adição de resíduos vegetais ao solo apresentavam maior E_4/E_6 , em comparação ao solo descoberto, o que pode estar relacionado ao fato de que a adição sistemática de resíduos vegetais ao solo, mantém predominantemente formas mais lábeis de C no solo, os quais diminuem com a profundidade em PD.

Kalbitz et al., (1999) estudando o efeito de várias sistemas de uso e manejo do solo e baseados em estudos prévios de Chin et al., (1994) e McKnight et al., (1997), reportaram também a utilização da absorbância em 285 nm como chave para inferir sobre o caráter aromático das substâncias húmicas. Neste comprimento de onda, ocorre a transição de elétrons de

substâncias fenólicas, compostos aromáticos e policíclicos, supostamente responsáveis pela maior recalcitrância da MOS.

A absorção específica em 285 nm em MOD obtida de solos cultivados intensivamente foi consideravelmente maior do que aquela medida em soluções extraídas de solos sob vegetação natural. A maior decomposição da matéria orgânica desses solos devido ao excessivo revolvimento do solo, está associada ao aumento do grau de recalcitrância da MOD (Kabitz, 2001).

3. HIPÓTESES E OBJETIVOS GERAIS

3.1. Hipóteses

O sistema plantio direto combinado a sistemas de cultura com alto aporte de resíduos vegetais promove alterações no conteúdo de C no solo inteiro, em frações físicas e na matéria orgânica dissolvida. O aumento no estoque de C total, no C lábil e no C orgânico extraível em água são decorrentes principalmente da menor mobilização do solo no sistema plantio direto e da presença de leguminosas e/ ou adubação nitrogenada, as quais incrementam a adição de resíduos vegetais e proporcionam maiores índices de manejo de carbono. Além disso, o sistema plantio direto e sistemas de culturas com alto aporte de resíduos vegetais promovem acúmulo de C em camadas subsuperficiais, ampliando o potencial de retenção de C no solo. Todavia, as práticas de manejo envolvem custos energéticos na forma de C equivalente, os quais devem ser considerados na avaliação da capacidade de retenção de C no solo.

3.2. Objetivos

Avaliar o efeito de sistemas de manejo do solo sobre os estoques de C total, C lábil e C extraível em água em um experimento de longa duração e inferir sobre a qualidade dos sistemas de manejo adotados, bem como estimar a capacidade de retenção de C em camadas superficiais e subsuperficiais do solo.

4. MATERIAL E MÉTODOS GERAIS

4.1. Localização e caracterização edafo-climática

A pesquisa foi realizada em um experimento de manejo do solo, instalado em abril de 1985, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS – EEA, no município de Eldorado do Sul, RS. A estação experimental está localizada nas coordenadas geográficas 30° 50' 52" S e 51° 38' 08" W. O relevo da área é ondulado com altitude de 46 m e a vegetação nativa predominante é campo nativo, composto principalmente por gramíneas rasteiras e desmódio (*Desmodium sp.*).

A área pertence a região fisiográfica da Depressão Central e apresenta clima subtropical úmido, Cfa segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 19,4 °C, variando entre 9 e 25 °C entre o mês mais frio e o mês mais quente do ano, respectivamente (Bergamaschi et al., 2003). A precipitação média é de 1.440 mm, com curtos períodos de déficit hídrico no verão. O solo do experimento é um Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999), derivado de granito com 220 g kg⁻¹ de argila. Os principais minerais na fração argila são caulinita (720 g kg⁻¹) e óxidos de ferro (109 g kg⁻¹) (Bayer, 1996).

O experimento foi implantado numa área que, durante 16 anos, foi explorada como área de pesquisa para produção de grãos em preparo convencional, o que determinou avançado grau de degradação do solo, como aumento da densidade, desagregação, diminuição da taxa de infiltração e o aumento erosão do solo pelo excessivo revolvimento e remoção sistemática dos resíduos das culturas. No ano que antecedeu a instalação do experimento a área foi calcariada (1 Mg ha⁻¹ calcário dolomítico incorporado) e cultivou-se aveia preta em toda a área experimental.

No inverno de 1985, seguindo um delineamento de blocos casualizados, com três repetições e dispostos em parcelas subdivididas, o experimento intitulado “Preparos de Solo e Cobertura Vegetal como Alternativa de Conservação do Solo”, foi implantado. Hoje, 20 anos após, representa um dos poucos experimentos de longa duração do estado conduzido de forma contínua.

4.2. Descrição dos tratamentos e condução do experimento

O experimento constou de três sistemas de preparo do solo, dispostos nas parcelas principais com 15 x 20m, sendo: PC - preparo convencional, PR - preparo reduzido, e PD - plantio direto. Nas subparcelas, que medem 5 x 20m, estão dispostos os sistemas de culturas: A/M - aveia (*Avena strigosa*)/milho (*Zea mays*), V/M - vica (*Vicia sativa*)/milho e AV/MC - aveia+vica/milho+caupi (*Vigna unguiculata*), os quais foram manejados em dois níveis de adubação nitrogenada, 0 e 180 kg de N ha⁻¹, aplicados em faixas nos blocos na cultura do milho.

As culturas de inverno são implantados em abril-maio seguindo as recomendações técnicas. A aveia, quando cultivada isoladamente foi semeada a uma taxa de 80 kg semente ha⁻¹; em consórcio com vica utiliza-se 30 kg ha⁻¹ de aveia e 40 kg ha⁻¹ de vica. Para a vica solteira utiliza-se 70 kg ha⁻¹. No sistema de cultura AV/MC, a cultura do caupi foi semeada 20-30 dias após a semeadura do milho, nas entrelinhas das plantas de milho, em covas distantes aproximadamente 40 cm com 3-4 sementes por cova. Após a colheita do milho, as plantas de caupi permanecem na área até o inverno, quando sesnecem com as primeiras geadas.

O PC foi realizado anualmente antes da implantação da cultura de verão, no caso o milho e consiste de uma aração, seguida de duas gradagens. O PR foi efetuado antes da semeadura do milho e consistiu de uma escarificação. O PD consistiu da semeadura do milho através da palhada das plantas de inverno que foram previamente dessecadas. Para todos os preparos a cobertura de inverno foi manejada com rolo-faca e dessecação com herbicida.

O milho é semeado anualmente no mês de outubro, recebendo adubação de P e K similar em todos os tratamentos, na quantidade de 250 kg da fórmula 00-20-20 ha⁻¹. A aplicação de N mineral (uréia) em cobertura foi realizada em dois estágios: primeiro aos 10 a 20 dias, no estágio fenológico V4, com 1/3 da dose e o segundo em V6, com 2/3 da dose. Durante o ciclo de desenvolvimento do milho são executados tratos culturais como o controle de ervas daninhas e o manejo da irrigação conforme necessário. A produtividade de grãos é avaliada numa área de 5,4 m² por parcela e corrigida para 12,5 % de umidade.

Durante a condução do experimento foram implementados variações dos sistemas de culturas. No período de 1985 a 1989, o tratamento V/M, foi conduzido com um consórcio de trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum*) e aveia preta. A partir de 1990 o consórcio passou a ser de vica e aveia, e em 1995 como vica solteira, mantido até o presente momento. A dose de adubação nitrogenada aplicada ao milho na forma de uréia também foi alterada neste período e passou de 120 kg N ha⁻¹ para 180 kg N ha⁻¹ a partir de 1994, perfazendo uma dose média para o período de 150 kg N ha⁻¹. O experimento recebeu aplicação de calcário em 4 oportunidades, sendo a primeira no ano de implantação (1 Mg ha⁻¹), seguida de 1988, 1992 e 1996 na quantidade de 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico. Maiores detalhes da condução do experimento e tratos culturais são descritos em Freitas et al. (1996), Bayer et al. (2000a), Lovato et al. (2004).

4.3. Amostragem do solo

O solo foi amostrado em outubro de 2003, tendo o experimento 18 anos de duração. Os tratamentos amostrados foram o PC e o PD sob os sistemas de culturas A/M, V/M e AV/MC nos dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹). A amostragem foi realizada anterior aos preparos de solo para a implantação da cultura do milho nas profundidades de 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2 a 0,3 m, com auxílio de espátulas. Adicionalmente, para os tratamentos extremos (PC A/M 0 kg N ha⁻¹ e PD AV/MC 180 kg N ha⁻¹), o solo foi amostrado também nas profundidades de 0,3-0,4, 0,4-0,5, 0,5-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m com trado calador. Todas as amostras

foram retiradas numa faixa transversal às linhas de semeadura do milho e posteriormente secas ao ar em casa de vegetação, moídas e passadas em peneira de malha 2 mm.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ESTUDO I: Acúmulo de C no solo e os custos em C equivalente relacionados aos sistemas de preparo, sistemas de cultura e adubação nitrogenada

5.1.1. Introdução

O solo é um importante componente do ciclo global do C, influenciando a qualidade do ar e da água. Atualmente, é crescente o interesse em relação ao potencial que o solo apresenta em armazenar C e, conseqüentemente, contribuir para mitigar o efeito estufa. Dentre os gases do efeito estufa, que são emitidos na agricultura, destaca-se o dióxido de C (CO₂), representando aproximadamente 20% das emissões antropogênicas globais (IPCC, 2001).

Como medida para minimizar as emissões de CO₂ oriundas da agricultura tem-se como alternativa a retenção de C orgânico no solo, envolvendo sistemas com menor mobilização do solo e alto aporte de resíduos vegetais. Em ambientes tropicais e subtropicais, o menor revolvimento do solo minimiza as perdas por oxidação biológica do C orgânico do solo (Gregorich et al., 1995; Bayer et al., 2000a; Lovato et al., 2004), além de potencializar o mecanismo de proteção física da MO (Feller & Beare, 1997; Six et al., 1999), onde o solo passa a atuar como um reservatório de C.

Em sistemas conservacionistas, a utilização de culturas com alto aporte de resíduos vegetais ao solo contribuem para o acúmulo de C orgânico no solo (Burle et al., 1997). Porém, a quantidade de resíduo adicionado ao solo depende de fatores relacionados aos sistemas de rotação de culturas adotados

e às práticas de manejo como a adubação e calagem. Por exemplo, Lovato (2001) obteve 92 e 38% de incremento no aporte de C ao solo nos sistemas aveia/milho e vicia/milho, respectivamente, pela aplicação de 139 kg N ha⁻¹, salientando-se o menor efeito do N mineral no sistema com leguminosa, a qual fornece parte do N necessário para o milho via fixação simbiótica. Além disso, espécies com capacidade de alocar C em maiores profundidades do perfil, via sistema radicular, representam uma contribuição importante para o armazenamento de C no solo (Balesdent & Balabane, 1996; Bolinder et al., 1999). Bayer et al. (2005) numa síntese de resultados verificaram que 43% do C orgânico até 1,0 m encontra-se abaixo de 0,2 m, o que amplia o potencial do solo em reter C atmosférico.

Na região subtropical do Brasil são estimadas taxas médias de retenção de C no solo de 0,19 a 0,81 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para a camada de 0-0,2m (Bayer et al., 2006a). Todavia, apesar das taxas de retenção de C orgânico no solo, serem um bom referencial para a estimativa do seqüestro de C, os sistemas de produção envolvem custos energéticos na forma de CO₂, os quais devem ser considerados para avaliar a contribuição ambiental efetiva da prática de manejo (Schlesinger, 1999, Lal, 2004a). O consumo de combustíveis fósseis e a industrialização dos insumos constituem-se nos principais custos energéticos relacionados à agricultura. A queima de 1 litro de diesel, libera à atmosfera o equivalente a 0,8 kg de C (Lal, 2004a; Agência Nacional do Petróleo, 2003). Neste sentido, Portella & Richerdson (1980), verificaram que as operações agrícolas de preparo de solo, resultam no consumo de combustível cerca de 50% menor no PD do que no sistema de PC.

A adubação nitrogenada é uma importante estratégia para incrementar a produtividade e o aporte de resíduos das culturas (Amado et al., 2000) e também contribui para o aumento de C no solo (Diekow et al., 2005a). Porém, na industrialização do N mineral o custo energético equivale a emissão de 1,3 kg de C para cada kg de N produzido (Lal, 2004a). Assim, analisando os dados de retenção de C, para os sistemas com adubação nitrogenada, o efeito sobre o seqüestro é positivo, no entanto, quando o custo energético do insumo é contabilizado, a taxa de seqüestro é reduzida. Dessa forma, a contribuição efetiva da adubação nitrogenada para o seqüestro de C é menor do que a estimada a partir da diferença entre o estoque de C no solo num dado período.

Neste contexto, elaborou-se as seguintes hipóteses para este estudo:

- sistemas de culturas com leguminosas e o uso de adubação nitrogenada aumentam a adição de resíduos vegetais ao solo principalmente pelo aumento da produção de fitomassa por gramíneas;
- sistemas de manejo com menor revolvimento do solo e maior aporte de resíduos vegetais promovem acúmulo de C em camadas superficiais e subsuperficiais do solo;
- o sistema plantio direto associado a sucessão de culturas com leguminosas contribuem efetivamente para o seqüestro de C no solo, enquanto a adubação nitrogenada não se constitui numa estratégia eficiente para promover o seqüestro de C no solo, uma vez que o custo energético desta prática se equívale ao efeito no acúmulo de C no solo.

Para verificar as hipóteses acima delineou-se os seguintes objetivos:

- avaliar a adição de C e o acúmulo deste elemento no solo em plantio direto e preparo convencional em combinação a sistemas de cultura e adubação nitrogenada;
- avaliar o potencial de acúmulo de C em subsuperfície pelos diferentes sistemas de manejo;
- avaliar os custos energéticos na forma de C equivalente das práticas de manejo adotadas no experimento e a real contribuição destas no seqüestro de C no solo na região subtropical do Brasil.

5.1.2. Material e métodos

5.1.2.1. Experimento de campo e coleta de amostra de solo

As informações referentes ao experimento de campo e os procedimentos de coleta e preparo das amostras de solo foram descritas no Material e Métodos Geral (capítulo 4).

5.1.2.2. Tratamentos e camadas de solo avaliadas

Neste primeiro estudo foram avaliados todos os tratamentos amostrados a campo, sendo eles: PC e PD combinados a A/M, V/M e AV/MC, todos em dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹) aplicados na cultura do milho. A avaliação considerou as camadas de 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2 - 0,3 m. Adicionalmente, os sistemas extremos (PC A/M 0N e PD AV/MC 180N) quanto a adição de C ao solo foram amostrados também nas profundidades de 0,3-0,4, 0,4-0,5, 0,5-0,6, 0,6-0,8 e 0,8 a 1,0 m.

5.1.2.3. Estimativa da adição de C ao solo

As adições anuais de C pelos sistemas de culturas foram estimadas a partir de resultados de produtividade de milho e de matéria seca (MS) das plantas de cobertura. Para a estimativa da MS produzida pelo milho, utilizou-se a relação entre MS na maturação fisiológica e o rendimento de grãos de milho, descrita por Lovato (2001). A produção de MS das plantas de cobertura do 1° ao 14° ano foi obtida de Lovato (2001) e do 15° ao 18° ano foram determinadas a campo. Na estimativa da adição de C pelas plantas de cobertura e pelo milho, utilizou-se o teor médio de 40 % de C na MS e considerou-se um adicional de 30 % de contribuição pelas raízes (Lovato et al., 2004).

5.1.2.4. Determinação e cálculo dos estoques de C orgânico no solo

Para a determinação de C orgânico, uma porção de aproximadamente 20g da amostra foi moída fina (50mpp) em gral de ágata. O C orgânico foi determinado por combustão seca em analisador de C Shimadzu – TOC (modelo V_{CSH}). O estoque de C orgânico no solo foi calculado em massa equivalente de solo (Sisti et al., 2004), considerando o solo em campo nativo como sistema de referência (Lovato, 2001) e os valores de densidade do solo determinadas por Silva et al. (2005). Para os estoques de C orgânico no solo anteriores a 2003 foi utilizado um fator de correção de 0,9422, correspondendo

ao coeficiente angular da relação entre os teores de C determinados pelo método de combustão úmida (Walkley & Black), utilizado nos anos anteriores a 2003, e os teores determinados com analisador Shimadzu.

5.1.2.5. Estimativa do seqüestro de C no solo

As taxas anuais de retenção de C no solo foram calculadas em relação ao sistema PC A/M 0 kg N ha⁻¹, o qual foi considerado como referência do manejo tradicional na região.

Os custos anuais em carbono equivalente (CE) para as operações agrícolas e insumos (Tabela 1) foram baseados em Lal (2004a). Para o experimento em questão, apenas considerou-se os custos em CE das operações de preparo do solo e semeadura e da adubação nitrogenada, sendo que as demais práticas e insumos empregados foram idênticos em todos os tratamentos. O sequestro de carbono foi estimado pela diferença entre o acúmulo de C no solo e o custos em CE das práticas de manejo em relação ao sistema PC A/M 0 kg N ha⁻¹.

5.1.2.6. Análise estatística

Os efeitos dos tratamentos no C orgânico do solo foram testados pela análise de variância e a diferença entre médias de tratamentos pelo teste de Tukey a 5 %. A relação entre variáveis foi avaliada pela significância dos coeficientes de correlação de regressões polinomiais.

TABELA 1. Base de cálculo dos custos em carbono equivalente (CE) para a execução de práticas de manejo e processos industriais de insumos utilizados na agricultura

Práticas de manejo/insumo	Gasto insumo ¹	kg CE/un. insumo	CE (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Operações prep. solo/semeadura	Diesel, L ha⁻¹ ano⁻¹		
• aração	17,5	0,80	14,00
• gradagem	7,4 (2x)	0,80	11,84
• semeadura PC	3,2	0,80	2,56
• semeadura PD	3,8	0,80	3,04
Irrigação			
• Bombeamento (50 cm/ano)	-	200,00	200,00
• instalação irrigação	-	6,74	6,74
Fertilizante	Fertilizante, kg ha⁻¹ ano⁻¹		
• N	150	1,30	195,00
• P ₂ O ₅	50	0,20	10,00
• K ₂ O	50	0,15	7,50
• CaCO ₃	390	0,16	62,40
Defensivos	Ing. ativo, kg ha⁻¹ ano⁻¹		
• herbicida	6,3	1,80	11,34
• aplicação herbicida	-		1,4
Colheita			
• milho	-		10,00

¹ Contabilizados no experimento na média de 18 anos.

Fonte: Adaptado de Lal (2004a).

5.1.3. Resultados e discussão

5.1.3.1. Adição de C pelas culturas

A adição de C ao solo variou de aproximadamente 4 a 8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, sendo maior nos sistemas com leguminosas e adubação nitrogenada (Figura 1). Sem adubação nitrogenada, a presença de leguminosas aumentou 40 (vica) e 87% (vica+caupi) o aporte de C em comparação ao sistema A/M. O aporte de resíduos pelas leguminosas resultou na maior produção de fitomassa em comparação a aveia isoladamente, bem como aumentou a produção de resíduos pelo milho cultivado em sucessão, o que é decorrente da maior disponibilidade de N no sistema (Amado et al., 2000). Especificamente, em relação ao caupi, além da produção de fitomassa por essa espécie (Figura 1), a

sua inclusão promove uma maior produção de fitomassa pela cultura da aveia cultivada em sucessão.

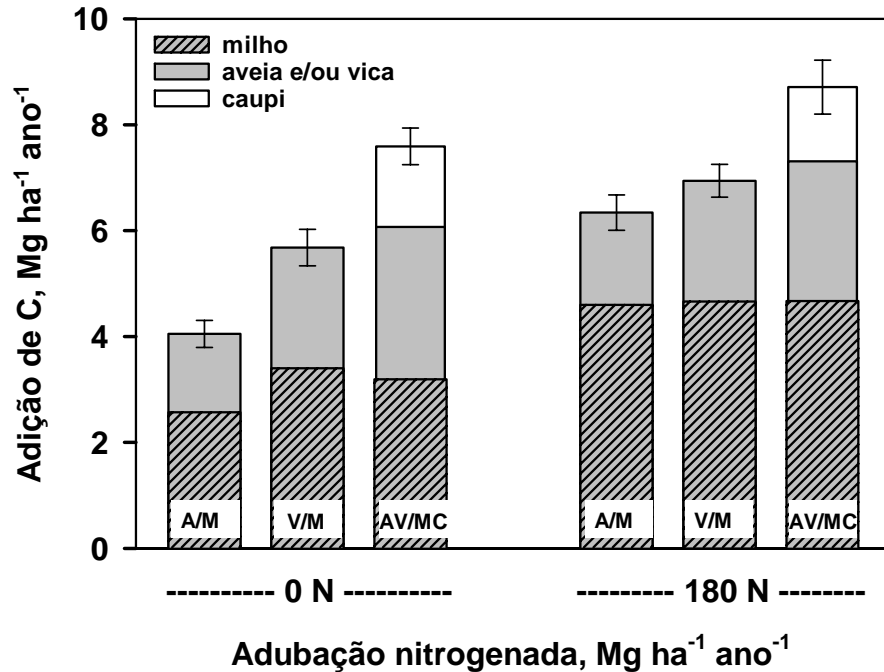


FIGURA 1. Carbono adicionado pelas plantas de cobertura (aveia, vica e caupi) e pelo milho em Argissolo Vermelho, em diferentes sistemas de culturas (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) e dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹). Média de 18 anos, dois sistemas de preparo do solo e três repetições.

O milho apresentou contribuição expressiva na adição de C ao solo, variando de 42% (3,19 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) no sistema AV/MC 0N a 73% (4,64 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) no sistema A/M 180N da adição total de C ao solo. A adubação nitrogenada aumentou a adição de C ao solo pelo milho em todos os sistemas de culturas e sendo este efeito maior no sistema A/M (36%) em comparação aos sistemas com leguminosas (V/M e AV/MC), cujo efeito foi inferior a 20%. A resposta adicional do sistema ao N mineral foi menor nos sistemas com leguminosa, pois o N adicionado por estas permite ao milho maior produtividade de grãos e de matéria seca de resíduos quando comparado a sistemas exclusivamente com gramíneas. Resultados semelhantes foram obtidos por Lovato et al. (2004). Segundo os autores, a inclusão de leguminosas de inverno na rotação de culturas, resultou em aumento nos

estoques de C e N do solo, sendo este resultado relacionado ao efeito benéfico da leguminosa no aporte de C pelo milho em sucessão. Outros trabalhos também reforçam a importância do milho no sistema de cultura, favorecendo o aumento da MOS (Balesdent & Balabane, 1996; Angers et al., 1995), principalmente pela adição de C pelo sistema radicular (Bolinder et al., 1999), o qual está em contato direto com a matriz mineral do solo.

5.1.3.2. Teores e Estoques de C orgânico no solo

O cultivo do solo que precedeu a instalação do experimento, originalmente sob campo nativo, resultou na redução do estoque de C orgânico de 44,7 Mg ha⁻¹ (1969) para 33,4 Mg ha⁻¹ (1985) na camada de 0-0,2 m (Tabela 2). A perda de C orgânico do solo foi decorrente de práticas inadequadas de manejo, como excessivo revolvimento do solo e baixo aporte de resíduos (Bayer et al., 2000a).

Após 18 anos da implantação dos tratamentos de manejo de solo, os teores de C orgânico foram maiores no solo em PD do que em PC (Tabela 2). O solo em PD apresentou maior concentração de C até a profundidade de 0,05 m, com um gradativo decréscimo no perfil do solo, enquanto no solo em PC a concentração de C foi relativamente uniforme no perfil. O menor grau de revolvimento do solo no sistema PD e a deposição dos resíduos sobre a superfície do solo, resultam nesse gradiente de concentração de C, o qual não foi observado no sistema PC, devido a incorporação de resíduos na camada de 0-0,2 m pelas operações de lavração e gradagem.

Os estoques de C orgânico no solo na camada de 0-0,2 m foram maiores no sistema PD (35,4 Mg ha⁻¹) se comparado ao sistema PC (31,3 Mg ha⁻¹) (Tabela 2), o que representou uma taxa média de acúmulo de 0,23 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ superior no sistema PD. O menor revolvimento do solo no sistema PD minimiza a oxidação biológica do C orgânico, como verificado por Bayer et al. (2000a) e Lovato et al., (2004). Além disso, a manutenção e estabilidade dos agregados do solo pelo não revolvimento aumenta a proteção física da MOS (Six et al., 1999; Feller & Beare, 1997). Dentro dos agregados do solo, a menor difusão de O₂ e o efeito de barreira física, impede a ação direta de

microrganismos e de suas enzimas sobre o material orgânico (Sollins et al, 1996; Krull et al., 2003).

TABELA 2. Teores e estoques de C orgânico nas camadas de 0-0,3 m de um Argissolo submetido a sistemas de manejo por 18 anos

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Dose N (kg ha ⁻¹)	profundidade, m						
			0-0,025	0,025-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0-0,2	0-0,3
			----- g kg ⁻¹ -----			----- Mg ha ⁻¹ -----			
Campo nativo ³			24,6	18,0	13,2	11,6	10,2	44,7	61,4
Início do experimento ³			11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	33,4	47,4
PC	A/M	0	9,6	8,6	8,8	8,6	8,6	27,8	41,8
		180	10,2	9,7	9,2	9,4	9,4	29,9	45,3
	V/M	0	10,8	10,0	10,0	9,8	9,6	31,6	47,2
		180	10,8	10,3	9,9	10,0	9,9	32,0	48,1
	AV/MC	0	11,9	10,7	10,5	9,9	9,5	32,8	48,2
		180	12,8	11,3	10,5	10,2	9,4	33,8	49,1
PD	A/M	0	16,4	11,6	8,8	8,4	9,5	31,2	46,5
		180	19,9	14,3	9,6	8,1	9,0	33,6	48,2
	V/M	0	21,2	15,2	10,6	8,7	8,9	36,1	57,5
		180	20,0	14,1	10,6	8,5	8,9	34,9	49,4
	AV/MC	0	22,2	15,9	10,7	9,1	9,4	37,4	52,7
		180	24,3	16,7	11,7	9,2	9,6	39,5	55,0
<i>Média de preparo</i> ⁴									
PC			11,0 b	10,1 b	9,8 a	9,7 a	9,4 a	31,3 b	46,6 a
PD			20,7 a	14,6 a	10,3 a	8,7 a	9,2 a	35,4 a	51,6 a
<i>Média de sistema cultura</i> ⁴									
A/M			14,0 b	11,0 b	9,1 b	8,6 b	9,1 a	30,6 b	45,5 b
V/M			15,7 ab	12,4 ab	10,3 ab	9,3 ab	9,3 a	33,7 a	50,6 a
AV/MC			17,8 a	13,7 a	10,8 a	9,6 a	9,5 a	35,9 a	51,3 a
<i>Média de Dose N</i> ⁴									
0			15,4 b	12,0 a	9,9 a	9,1 a	9,3 a	32,8 b	49,0 a
180			16,3 a	12,7 a	10,3 a	9,2 a	9,4 a	34,0 a	49,2 a

¹ PC: preparo convencional; PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho; V/M: vica/milho; AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

³ Dados de Lovato et al. (2004).

⁴ Médias na mesma coluna seguidas por mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P < 0.05$).

Os sistemas de culturas afetaram a concentração de C até 0,2m e os estoques nas camadas de 0-0,2 e 0-0,3m. Similar ao que foi observado na adição de C ao solo (Figura 1), os maiores teores de C foram observados no sistema AV/MC (Tabela 2), e os menores no sistema A/M. Comparando o

sistema A/M, com outros que incluem leguminosas (V/M e AV/MC), o estoque de C na camada de 0-0,2m foi 3,1 e 5,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ maior nos sistemas V/M e AV/MC, respectivamente. Na camada de 0-0,3 m, estas diferenças aumentaram para 5,1 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no sistema V/M e 5,8 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no sistema AV/MC. Estes resultados reforçam a significativa contribuição da leguminosas no aumento do C no solo em regiões subtropicais manejadas sob plantio direto (Burle et al., 1997; Sisti et al., 2004).

O efeito dos sistemas de culturas nos estoques de C orgânico no solo relacionou-se ao aporte de resíduos vegetais (Figura 2). Assim, a inclusão de leguminosas em sistemas de culturas e a adubação nitrogenada, que resultam em aumento da adição de resíduos vegetais, podem favorecer o acúmulo de C orgânico no solo, similar ao relatado em trabalhos de Burle et al. (1997), Lal et al. (1999), Bruce et al. (1999) e Lovato et al. 2004). No caso do sistema de cultura AV/MC, a espécie de cobertura caupi apresenta altos teores de lignina (Gomes, 2006 – dados não publicados), o que confere maior recalcitrância molecular ao material orgânico e dificulta a ação microbiana (Paustian et al., 1992).

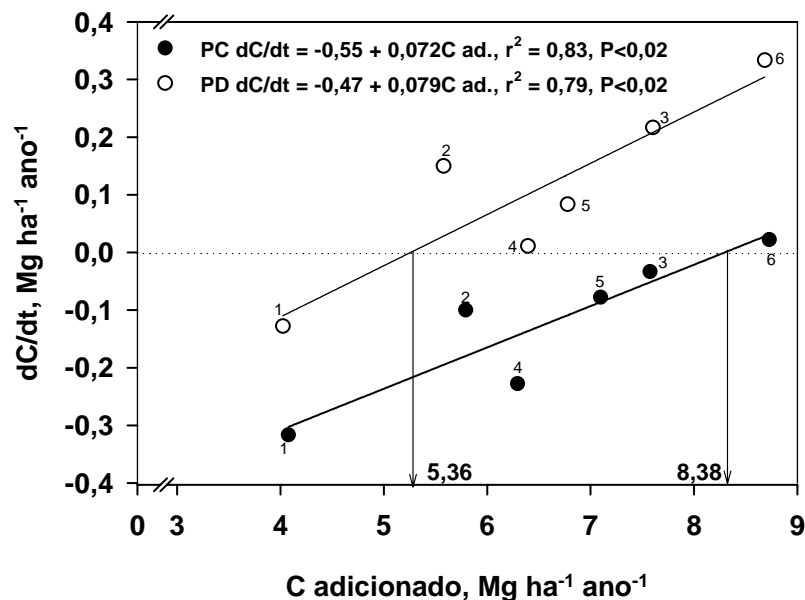


FIGURA 2. Relação entre o C adicionado ao solo anualmente (média de 18 anos) por sistemas de cultura (culturas cobertura+milho) em duas doses de N mineral e a variação do C orgânico no solo no tempo (dC/dt) em relação ao estoque no início do experimento. PC: preparo convencional; PD: plantio direto. 1 – A/M 0 kg N ha⁻¹, 2 – V/M 0 kg N ha⁻¹ e 3 – AV/MC 0 kg N ha⁻¹, 4 – A/M 180 kg N ha⁻¹, 5 – V/M 180 kg N ha⁻¹ e 6 – AV/MC 180 kg N ha⁻¹. (A: aveia, V: vicia, M: milho, C: caupi).

A aplicação de N mineral também promoveu aumento significativo nos teores de C no solo (Tabela 2). O estoque de C na camada de 0-0,2m foi $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior no tratamento que recebeu N em relação a não aplicação de N mineral. Este incremento no estoque de C pela aplicação de N, evidencia o efeito positivo da adubação nitrogenada na produção de fitomassa do milho (Figura 1) como também reportado por Campbell et al. (1991) e Lovato et al. (2004). Por outro lado, a adubação nitrogenada aumentou a perda de C por processos oxidativos (priming effect). Anualmente foram depositados ao solo em média $3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de resíduos vegetais a mais no sistema com adubação nitrogenada do que no sistema não adubado (Figura 1). Ao fim de 18 anos, isso representou 69 Mg ha^{-1} de resíduos vegetais a mais no sistema com adubação nitrogenada. Esse material orgânico resultou no acúmulo de $1,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na camada de 0-0,2 m (Tabela 2), representando uma relação de 58 Mg ha^{-1} de C adicionado ao solo para 1 Mg C ha^{-1} acumulado no solo. Quando comparado aos sistemas de culturas com leguminosas, na ausência da adubação nitrogenada, a relação C adicionado/C acumulado no solo foi de 17 e 28 para os sistemas V/M e AV/MC, respectivamente. Tão importante quanto a quantidade de N adicionado ao solo, o equilíbrio entre a adição de N e C durante o ano agrícola resultou numa maior eficiência dos sistemas com leguminosas. Por outro lado, a aplicação da adubação nitrogenada, poderia estar contribuindo para um aumento nas taxas de decomposição da MOS, acelerando a perda de C, em relação aos sistemas não adubados, o que tem sido denominado na literatura de efeito "priming". (Conde et al., 2005).

Entre os sistemas de preparo do solo as adições de C dos sistemas de culturas foram similares, porém os estoques de C orgânico no solo sob PD foram maiores do que no solo sob PC (Figura 2), o que indica maiores perdas no sistema PC em comparação ao sistema PD. Lovato et al. (2004) neste mesmo experimento, estimaram taxas de perda de C na ordem de $0,040$ e $0,019 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para PC e PD, respectivamente. Em virtude das menores perdas o sistema PD necessita 38% menos adição de resíduos vegetais para manter o estoque de C orgânico inicial do experimento ($dC/dt = \text{zero}$), em relação ao sistema PC. Isto correspondeu a necessidade de adicionar quantidades de matéria seca ao solo equivalentes a $13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em PD e $21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em PC. A produção de $21 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de fitomassa, mesmo

se tratando de uma região com alto potencial de produção de resíduos vegetais é inviável, determinando o declínio gradativo dos estoques de C ao longo dos anos (Figura 3a). Por outro lado, a necessidade de adição de MS do sistema PD ($13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) pode ser atingida com um adequado planejamento do sistema de rotação de culturas e adubação nitrogenada.

É oportuno ressaltar neste momento, o grande potencial da região subtropical do Brasil na produção de fitomassa, pois as condições climáticas permitem cultivos sucessivos durante o ano todo. Em contrapartida, as regiões tropicais, com estações secas e chuvosas bem definidas e as regiões temperadas, com as baixas temperaturas nos meses de inverno, praticamente limitam-se à produção de resíduos na estação de crescimento, o que encontram-se aquém do potencial das regiões subtropicais quentes e úmidas.

A Figura 3a apresenta a evolução temporal dos estoques de C orgânico no solo nos tratamentos sem adubação nitrogenada durante os 18 anos do experimento. Observa-se que no solo em PC, o estoque de C decresceu nos sistemas V/M ($-1,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e A/M ($-5,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$), enquanto o sistema AV/MC foi capaz de manter ou reduzir significativamente as perdas de C no solo ($-0,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Por outro lado, em PD o sistema de cultura que apresentou balanço negativo de C no solo foi o A/M, com perda de $2,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Os sistemas com leguminosas (V/M e AV/MC) incrementaram os estoques de C no solo em $2,7$ e $3,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para V/M e AV/MC, respectivamente. Estes resultados evidenciam a importância dos sistemas de cultura e do plantio direto na redução das perdas de C no solo. No entanto, os resultados demonstram que somente a adoção do sistema PD sem um adequado sistema de culturas não é suficiente para manter os estoques de C no solo.

No solo em PD, os sistemas de culturas AV/MC e V/M promoveram mudanças nos estoques de C no solo somente após 1990 (Figura 3a). Este comportamento pode ser devido a um efeito inércia deixado pelo cultivo do solo durante 15 anos em PC, anterior ao estabelecimento do experimento. Este período, provavelmente foi necessário para que as propriedades do solo fossem restabelecidas pela adoção do PD e de sistemas de cultura com alto potencial de adição de resíduos vegetais.

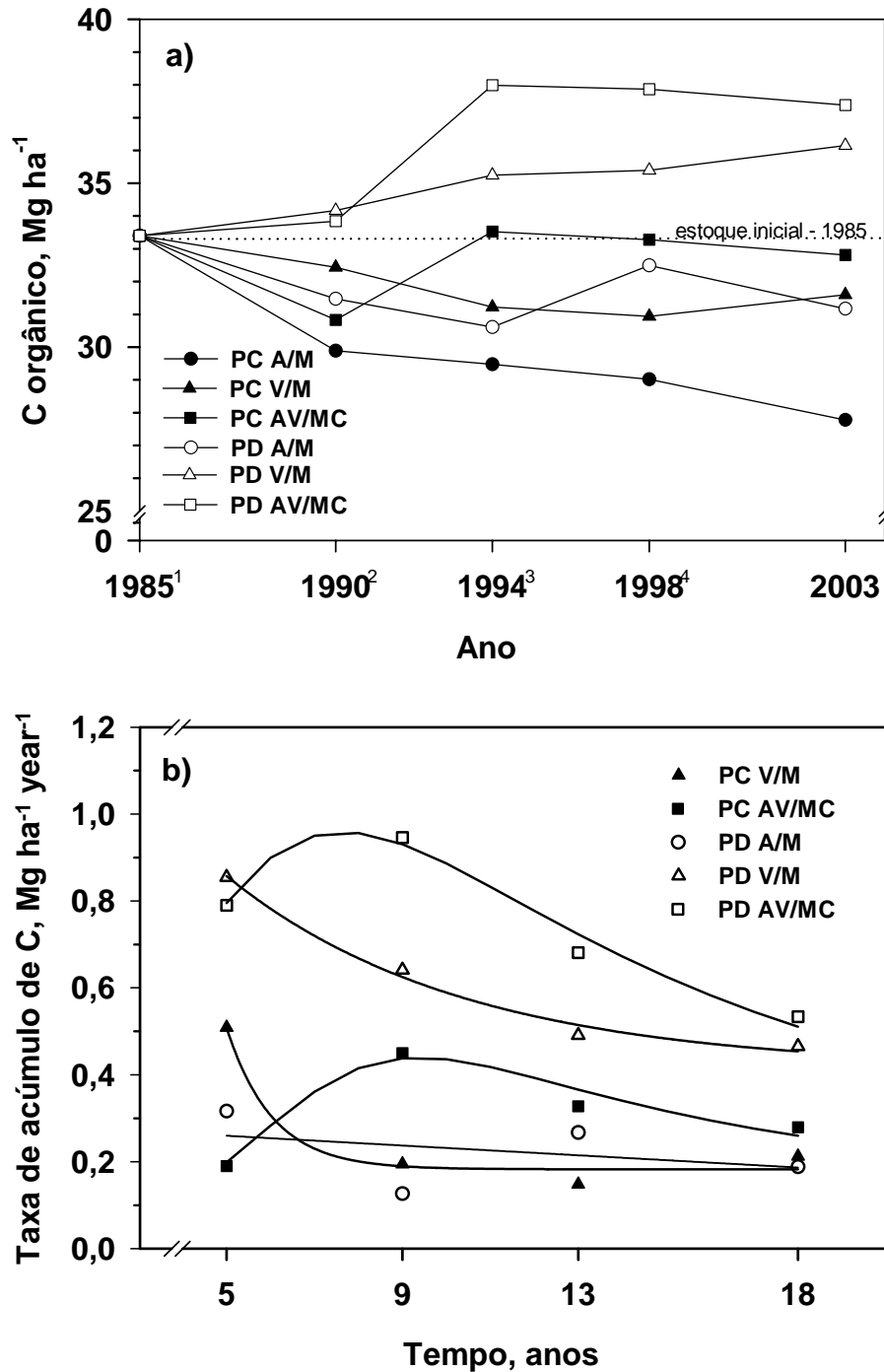


FIGURA 3. Evolução dos estoques de carbono (a) e estimativa das respectivas taxas de acúmulo de C em relação ao sistema PC A/M 0N (b) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) na ausência de N mineral. ¹ Freitas et al. (1996), ² Bayer & Mielniczuk (1997), ³ Bayer et al. (2000a) e ⁴ Lovato et al. (2004).

Nos sistemas de manejo onde o estoque de C diminuiu ao longo dos 18 anos, as maiores perdas ocorreram no período dos primeiros quatro anos, chegando a valores de 62% das perdas do período (1985 a 2003) no sistema PC A/M. O declínio total deste sistema foi de 17% no estoque de C inicial (Figura 3). Apesar do percentual de perda de C ser baixo (17%), salienta-se que o experimento iniciou com o solo degradado. Outros trabalhos onde o solo foi convertido de mata nativa para cultivos agrícolas, a perda no estoque de C original foi superior a 35% nos primeiros 10 anos de cultivo em ambientes subtropicais (Sá et al., 2001) e atingiu 70% em ambientes tropicais num período inferior a cinco anos (Silva et al., 1994). Em adição, os cultivos agrícolas, por exemplo trigo e soja, normalmente tem menor adição de C em relação a vegetação nativa, e portanto, culturas com alto aporte de C são imprescindíveis para manter os estoques de C no solo até mesmo em PD.

5.1.3.3. Estimativas do seqüestro de C no solo

Em termos de benefício ambiental no que se refere ao armazenamento de C no solo, taxas de acúmulo de C no solo nos diferentes sistemas manejo foram calculadas em comparação ao sistema PC A/M sem adubação nitrogenada, o qual foi tomado como referência por tratar-se de um sistema próximo ao sistema de manejo tradicionalmente utilizado na região. Este procedimento é baseado no fato de que, a contribuição de um dado sistema de manejo na melhoria na qualidade ambiental é o C retido no solo neste sistema de manejo somado ao C que deixou de ser perdido pela substituição do sistema de referência.

As taxas de acúmulo de C na camada de 0-0,2 m do solo em PC variaram entre 0,12 a 0,34 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 4a), enquanto em PD a variação foi de 0,19 a 0,65 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, ou seja, duas vezes maiores do que os valores observados no solo em PC. O sistema de cultura que mais contribuiu para o armazenamento de C foi o sistema AV/MC, seguido do V/M e A/M. As taxas de acúmulo de C dos sistemas conservacionistas como PD associado com V/M (média 0,44 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) ou AV/MC (0,59 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), tenderam a serem maiores do que as taxas estimadas em solos de regiões temperadas (0,24-0,40 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) sob PD (Lal et al., 1999; West & Marland,

2002). Entretanto, são comparáveis a média de $0,48 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ estimada por Bayer et al. (2006a) para solos em PD da região subtropical do Brasil.

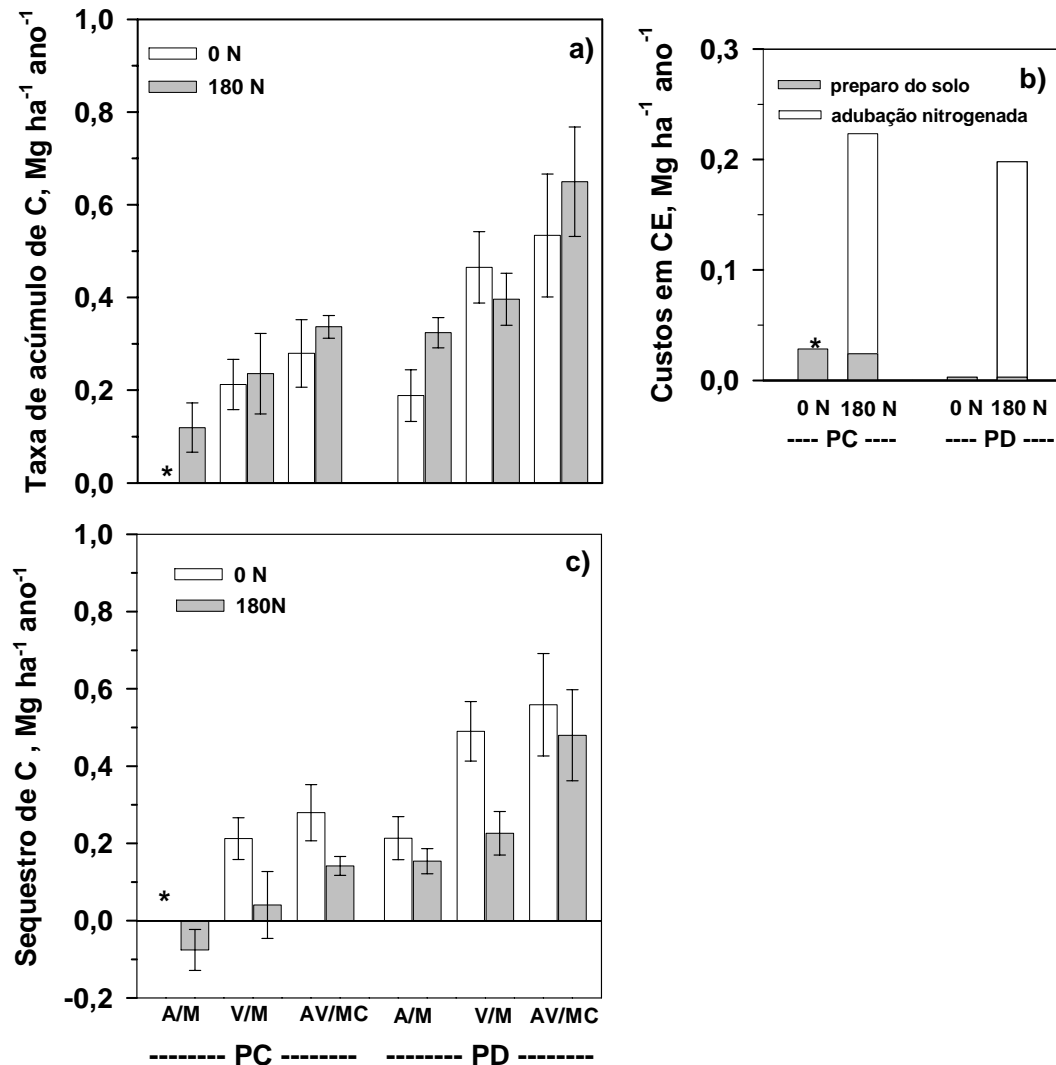


FIGURA 4. Taxa de acúmulo de C orgânico no solo (a), custos em carbono equivalente (CE) (b) e seqüestro de carbono no solo (c), na camada de 0-0,2 m, num experimento conduzido há 18 anos em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), sob três sistemas de culturas (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) e duas doses de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha^{-1}). * referência: PC A/M 0 kg N ha^{-1} .

Quando calcula-se as taxas de acúmulo de C no solo pela subtração entre os sistemas de interesse e a referência, assume-se que as taxas de acúmulo de C no intervalo de tempo considerado sejam lineares. Entretanto, as taxas de retenção de C no solo são maiores nos anos iniciais e decrescem

exponencialmente com o passar dos anos, como pode ser observado na Figura 3b. O acúmulo de C no solo nos sistemas A/M e V/M, foi maior nos primeiros anos, enquanto no sistema AV/MC, um pico de acúmulo de C foi observado ao redor dos 9 anos. O pico de acúmulo de C no sistema AV/MC foi relacionado ao efeito inércia deste sistema de cultura que apresenta alto potencial de aporte de C ao solo. O decréscimo exponencial das taxas de acúmulo de C no solo evidência que os solos agrícolas são realmente uma estratégia de curto prazo para a mitigação do efeito estufa, como já discutido por Lal (2004b). Muito embora, as taxas de acúmulo de C após 18 anos (Figura 3b) tenderam a estabilizar em valores consideráveis variando de 0,20 a 0,28 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no solo em PC e 0,40 a 0,60 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no sistema PD.

Na avaliação do benefício ambiental dos sistemas de manejo do solo estimou-se os custos energéticos das práticas de manejo adotadas, entendendo que a taxa de seqüestro de C no solo deve considerar os custos em CE das práticas de manejo (Schlesinger, 2000; Lal, 2004a), em adição a taxa de acúmulo de C orgânico no solo. Neste estudo, os custos energéticos com operações de preparo do solo foram equivalentes a 28,4 e 3,04 kg C ha⁻¹ ano⁻¹ para o sistema PC e PD, respectivamente e a adubação nitrogenada representou 0,195 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 4b).

Assim, enquanto as taxas de acúmulo de C no solo variaram entre 0,12 a 0,65 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, quando considerados os custos em C equivalente das operações de preparo do solo e da adubação nitrogenada, as taxas de seqüestro de C variaram de -0,08 a 0,56 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 4c). Os custos com as operações de preparo do solo salientaram os benefícios do PD em relação ao sistema PC, principalmente quando associado a leguminosas. Em contraste, quando os custos da adubação nitrogenada foram considerados, observou-se que o aumento no C do solo pela aplicação de N não representou um aumento no seqüestro de C no solo. O efeito benéfico da adubação nitrogenada foi contrabalanceado pelo alto custo em C equivalente desta prática (1,3 kg CE/Kg N mineral). Este é um exemplo claro de como o efeito das práticas de manejo sob o seqüestro de C no solo pode mudar se considerados os custos energéticos.

No entanto, a adoção da adubação nitrogenada não deve em momento algum ser questionada, mesmo sob o ponto de vista de qualidade

ambiental, pois a conversão de áreas em vegetação natural à agricultura, eqüivalendo a produção de grãos adicional dos sistemas adubados, implicaria em maiores custos ambientais e econômicos pela perda do C original (Silva et al., 1994; Sá et al., 2001). Portanto, deixar de usar adubo nitrogenado e aumentar a área explorada não é uma alternativa eficiente para a promoção da qualidade ambiental. Devemos sim, maximizar a produtividade das culturas gerando o mínimo de impacto ambiental possível.

5.1.3.4. Acúmulo de C em subsuperfície

As taxas de retenção de C no solo são relacionadas principalmente a camadas superficiais do solo (0-0,2 m). Todavia, a taxa de retenção de C estimada para a camada de 0-1,0 m ($1,05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), foi 38% superior a taxa de retenção de C observada na camada de 0-0,2 m ($0,65 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Figura 5b). A contribuição do armazenamento de C na camada de 0,2–1,0m correspondeu a 75% do estoque de C orgânico até 1,0m. Logicamente estes valores são altos devido a grande camada envolvida (0,8 m), porém os teores nessas camadas vêm sofrendo leves incrementos, ainda não significativos, em relação à referência, conforme ilustra a Figura 5a.

Outros autores também têm constatado acúmulo de C orgânico em profundidade. Sisti et al. (2004), trabalhando em um Latossolo com 63% de argila na região de Passo Fundo (RS), e Diekow et al. (2005a), em um Argissolo com 22% de argila na Depressão Central do RS, verificaram que o acúmulo de C na camada de 0-0,2 m representou somente 37 e 64%, respectivamente, do total de C acumulado na camada de 0-1,0 m. Bayer et al. (2005), numa síntese de resultados, observaram que 43% do acúmulo de C no solo ocorre na camada de 0,2-1,0 m, ampliando o potencial do solo em seqüestrar C. Dentre as possíveis explicações, as culturas com sistema radicular profundo (milho e caupi), o transporte vertical de resíduos pela fauna do solo e a lixiviação de compostos orgânicos, podem conjuntamente estar contribuindo para o aumento dos estoques de C em camadas subsuperficiais do solo. Apesar disso, a origem deste material orgânico e a sua alocação em profundidade não está muito clara. Estudos têm demonstrado que o sistema radicular poderia ser o principal responsável pelo acúmulo de C orgânico em

profundidade (Balesdent & Balabane, 1996), principalmente em regiões tropicais (Oades, 1988).

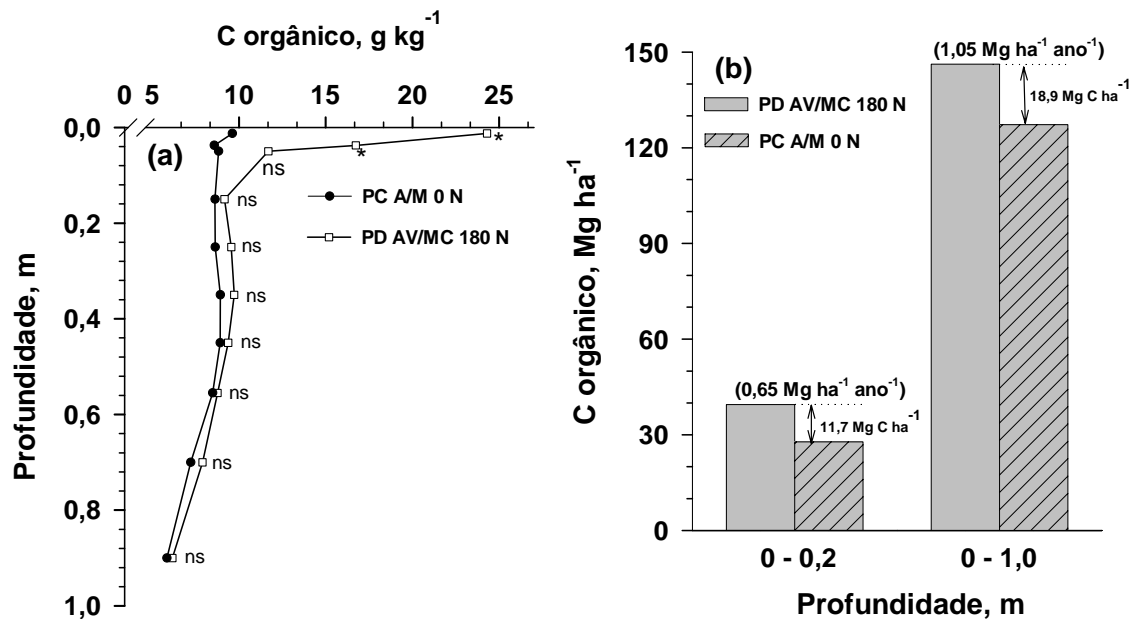


FIGURA 5. Teor e estoque de carbono orgânico total nas camadas de 0-0,2 e 0-1,0m de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo extremos quanto à adição de massa seca ao solo. * 5% de significância pelo teste de Tukey.

Boddey et al. (2005) relacionaram o acúmulo de C em profundidade com a maior deposição de raízes senescentes das culturas de aveia, vicia e milho em comparação as culturas de soja e trigo. Notadamente, a rotação aveia+vicia/milho apresenta maior aporte de resíduos vegetais ao solo se comparado com a rotação trigo/soja, o que provavelmente promove maior aporte de C também pelo sistema radicular destas plantas. Em adição, Bolinder et al. (1999) em solos do Canadá, concluíram que o coeficiente isohúmico de tecidos radiculares é em média 5% maior do que o da parte aérea, o que implica em uma maior preservação do C oriundo das raízes. A maior proteção do C das raízes foi relacionado com a composição química dos tecidos radiculares (maior relação lignina/N) e com a localização direta das raízes na matriz mineral (proteção intragregados). Portanto, o acúmulo de C em profundidade pelo sistema radicular pode estar sendo favorecido por três aspectos, primeiro a quantidade de material aportado ao solo, segundo a qualidade química dos resíduos radiculares e terceiro a proteção física do C

das raízes pela localização direta no interior de agregados estáveis na matriz do solo.

Por sua vez, as pesquisas relacionadas ao transporte vertical de resíduos pela fauna do solo e lixiviação de compostos orgânicos solúveis (carbono orgânico dissolvido, COD) são relativamente escassas. Alguns poucos trabalhos sobre a dinâmica do COD, com ênfase agrícola, foram desenvolvidos em região temperada, porém com resultados contrastantes e não conclusivos. Neste contexto, estudos mais detalhados são necessários, a fim de proporcionar subsídios científicos para concluir sob as formas de alocação e a origem do C em camadas mais profundas do solo.

5.1.4. Conclusões

1. A inclusão de leguminosas no sistema de cultura proporcionou aumento na adição de C ao solo, principalmente pela cultura cultivada em sucessão, o que promoveu acúmulo deste elemento no solo em plantio direto e preparo convencional. O mesmo efeito sobre a adição de C foi observado para adubação nitrogenada.
2. A menor mobilização do solo no sistema plantio direto promoveu incrementos nos estoques de C orgânico do solo na camada de 0-0,2 m em comparação ao sistema preparo convencional. As alterações nos estoques de C induzidas pelo manejo do solo ocorrem principalmente na camada superficial (0-0,2 m), porém são expressivas também em camadas subsuperficiais, até 1,0 m de profundidade, sugerindo a inclusão dessas camadas nos estudos de C orgânico do solo, pois ampliam o potencial de seqüestro de C pelo solo.
3. As taxas de acúmulo de C no solo em sistemas de manejo são maiores nos anos iniciais decrescendo exponencialmente ao longo dos anos e são relacionadas ao revolvimento do solo e ao aporte de resíduos vegetais.
4. O N incorporado no solo por leguminosas contribuiu mais eficientemente para o acúmulo de C no solo do que a aplicação de N mineral.

5. Os custos energéticos da adubação nitrogenada são superiores ao efeito dessa prática no acúmulo de C no solo, determinado menores taxas de sequestro de C em comparação a ausência da adubação nitrogenada.

6. O sistema plantio direto associado a sistemas de culturas com leguminosas contribuíram efetivamente para o seqüestro de C no solo, melhorando a qualidade ambiental.

5.2. ESTUDO II: Estoque de C na fração leve da MOS, labilidade do C e qualidade de sistemas de manejo do solo avaliada pelo índice de manejo de carbono

5.2.1. Introdução

O manejo do solo pode conduzir um sistema agrícola à sustentabilidade ou à degradação, dependendo da sua qualidade. Em nível mundial, estima-se que cerca de dois bilhões de hectares encontram-se degradados pelo intenso revolvimento do solo, pela agricultura extrativista e por fatores climáticos (Lal, 1997). A grande maioria destas áreas estão localizadas em regiões tropicais e apresentam baixos conteúdos de matéria orgânica no solo (MOS), a qual é essencial para a manutenção da qualidade do solo e do ambiente (Reeves et al., 1997; Larson & Pierce, 1994).

O sistema PD por propiciar um ambiente menos oxidativo promove aumentos no acúmulo de C no solo quando comparado ao sistema convencional de preparo do solo (Lal et al., 1999; Bayer et al., 2006a). As taxas de acúmulo de C no solo são proporcionais ao C adicionado pelas culturas, o qual é maior em rotações que incluem leguminosas (Lovato et al. 2004; Zanatta et al., 2006). Adicionalmente, os sistemas conservacionistas também promovem aumentos na proporção de C lábil da MOS em relação ao C total do solo, o que propicia alterações na labilidade do C (Shang et al., 1997; Diekow et al., 2005b), e nos fluxos de C e energia no solo.

O solo é um sistema aberto composto por subsistemas que interagem entre si. O aumento do estoque e da labilidade do C do solo favorece os fluxos de C e energia entre os subsistemas, através da atividade microbiana. O aumento nos fluxos de C e energia no solo promovem condições satisfatórias para melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Addiscott, 1995), evidenciadas pelo aumento do suprimento de nutrientes, estrutura do solo, armazenamento de água e atividade microbiana (Vezzani, 2001).

As alterações qualitativas e quantitativas na MOS podem compor um índice de manejo de C, o qual é eficiente para predizer a qualidade de sistemas de manejo do solo (Blair et al., 1995). O IMC é calculado em relação a um

sistema de referência, para o qual é definido o $IMC = 100$. O índice é obtido pelo produto entre um índice de estoque (IEC) e um índice de labilidade do C:

$$IMC = IEC \times ILC \times 100 \quad (1),$$

$$IEC = \text{estoque C do tratamento} / \text{estoque C da referência} \quad (2),$$

$$ILC = \text{labilidade (L) do C tratamento} / \text{labilidade do C referência} \quad (3),$$

$$L = \text{estoque de C da FL} / \text{estoque de C da fração pesada} \quad (4).$$

Na proposta original, a determinação da labilidade do C foi baseado na oxidação química da MOS com permanganato de K 333 mmol L^{-1} (Lefroy et al., 1997; Blair et al., 1995). Porém, estudos posteriores determinaram a necessidade de adequação da concentração de KMnO_4 para oxidar a matéria orgânica lábil em diferentes tipos de solo (Weil, et al., 2003). Somado a isso, a necessidade de cuidado com a exposição do reagente a luz, dificultou a adoção desta técnica e a ampla utilização do IMC. Diekow et al. (2005b) propuseram o fracionamento físico como uma alternativa para a determinação da labilidade do C. O fracionamento físico do C do solo permite a obtenção do C da fração leve, o qual é sensível às mudanças no manejo e tem relação direta com o C da fração lábil da MOS (Janzen et al., 1992; Bremer et al., 1995). Estudos conduzidos por Vieira et al. (2004) correlacionaram o C lábil obtido pelo fracionamento físico do C do solo e o C lábil obtido pela oxidação química da MOS com resultados satisfatórios. Porém, neste mesmo estudo, os autores verificaram que a concentração de permanganato de K adequada para a oxidar a MOS seria de 60 mM , em detrimento da concentração de 333 mM inicialmente proposta.

A utilização do IMC em diferentes sistemas de culturas sob PD, definiu o sistema de manejo, cuja rotação incluía leguminosas de verão, como o de maior qualidade (Diekow et al., 2005b). Estes sistemas aumentam o aporte de C ao solo e promovem maior acúmulo e qualidade da MOS. Neste mesmo estudo, a aplicação de N mineral aumentou a qualidade de sistemas de manejo, evidenciado pelo aumento do IMC destes sistemas. A aplicação do

IMC em sistemas de integração lavoura pecuária no Cerrado brasileiro por Salton (2005), identificou sistemas com inclusão de gramíneas na pastagem, alternadas com soja a cada dois anos em sistema PD, como os mais adequados para a manutenção dos estoques de C e promoção qualidade do solo.

Baseado no exposto, elaborou-se as seguintes hipóteses para este estudo:

- sistemas de manejo com menor revolvimento do solo e maior aporte de resíduos vegetais proporcionam o maior estoque de C na fração leve da MOS;
- a fração leve da MOS é sensível às mudanças do manejo e possibilita a determinação da labilidade do C no solo;
- a labilidade do C é maior em sistema conservacionista de manejo do solo e complementa a avaliação da qualidade de sistemas de manejo;
- o IMC composto por aspectos qualitativos (labilidade) e quantitativos (estoque) do C do solo é uma ferramenta útil para prever a qualidade de sistemas de manejo do solo, e relaciona-se positivamente com propriedades do solo.

Para testar as hipóteses acima, delineou-se os seguintes objetivos:

- avaliar o acúmulo de C na fração leve da MOS e a sensibilidade desta fração às mudanças no manejo do solo;
- avaliar a labilidade do C do solo e seu comportamento no perfil do solo em plantio direto e preparo convencional associado a sistemas de culturas com e sem adubação nitrogenada;
- avaliar a qualidade dos sistemas de manejo de solo, através do IMC e a relação deste com propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

5.2.2. Material e Métodos

5.2.2.1. Experimento de campo e coleta de amostra de solo

As informações referentes ao experimento de campo e os procedimentos de coleta e preparo das amostras de solo foram descritas no Material e Métodos Geral (capítulo 4).

5.2.2.2. Tratamentos e camadas de solo avaliadas

Neste estudo foram avaliados os tratamentos PC e PD combinados a A/M e AV/MC, nos dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹) aplicados na cultura do milho. A avaliação considerou as camadas de 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, nas quais foi realizado o fracionamento físico do C do solo. Adicionalmente, amostras de solo em campo nativo de área adjacente ao experimento, representando um sistema de referência foram avaliadas nas mesmas camadas.

5.2.2.3. Fracionamento físico densimétrico e análise de C

A uma amostra de 20 g de solo moído a 2,0 mm foi adicionado 80 mL da solução de NaI (1,8 g cm⁻³) em tubo de centrífuga. A suspensão foi submetida a sonicação com energia de 250 J mL⁻¹, a qual foi previamente calibrada para a completa dispersão do solo em estudo. Posteriormente, a suspensão foi centrifugada por 30 minutos a 2000 g e o sobrenadante foi filtrado a vácuo em filtro de fibra de vidro (1,2 µm), cuja massa foi previamente quantificada. O material (FL + filtro) foi seco em estufa a 50 °C, quantificado e moído em gral de ágata.

O teor de C foi determinado nas amostras de solo integral e da fração leve em analisador de C Shimadzu – TOC (modelo V_{CHS}). O estoque de C do solo integral e na FL foi calculado em massa equivalente de solo (Sisti et al., 2004), utilizando o solo do campo nativo como referência e as densidades determinadas por Silva et al. (2005) (Apêndice 5 e 7). O estoque de C na

fração pesada da MOS foi obtido pela diferença entre o estoque de C no solo integral e o estoque de C na FL.

5.2.2.4. Cálculo do IMC

O IMC foi calculado para a camada de 0-0,2 m, utilizando-se como referência (IMC = 100) o solo sob campo nativo. Foram estimados inicialmente, o índice de estoque de C (IEC), a labilidade (L) e o índice de labilidade (IL) dos sistemas de manejo para a camada de 0-0,2 m, conforme equações 2, 3 e 4. Adicionalmente, a labilidade da MOS foi determinada nas subcamadas de 0-0,2m. Na estimativa da labilidade do C, o C na fração leve da MOS foi considerado como o C lábil, enquanto o C na fração pesada da MOS, obtido pela diferença entre o C total e o C fração leve, foi considerado como o C não lábil.

5.2.2.5. Análise estatística

Os efeitos dos tratamentos no C orgânico do solo e no C da fração leve da MOS foram avaliados pela análise de variância e a diferença entre médias de tratamentos pelo teste de Tukey a 5 %. A relação entre variáveis foi avaliada pela significância dos coeficientes de correlação de regressões polinomiais.

5.2.3. Resultados e discussão

5.2.3.1. Índice de estoque de C

As alterações nos conteúdos de C no solo foram acompanhados por alterações também no conteúdo de C orgânico na FL da MOS (Tabela 3). Os teores de C orgânico no solo variaram de 24,3 a 9,6 g kg⁻¹ na superfície do solo e foram sensivelmente menores em camadas mais profundas (Tabela 3). Os estoques de C orgânico no solo variaram entre valores próximos de 27 e 39 Mg ha⁻¹ e determinaram índices de estoque de C entre 0,62 e 0,88 para a camada de 0-0,2 m (Tabela 4).

TABELA 3. Estoques e teores de C orgânico total e da fração leve da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho submetido a sistemas de manejo do solo durante 18 anos

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Dose N (kg ha ⁻¹)	profundidade, m				
			0-0,025	0,025-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0-0,2
			----- g kg ⁻¹ -----				Mg ha ⁻¹
			<i>C orgânico total</i> ³				
Campo nativo ⁴			24,6	18,0	13,2	11,6	44,7
PC	A/M	0	9,6	8,6	8,8	8,6	27,8
		180	10,2	9,7	9,2	9,4	29,9
	AV/MC	0	11,9	10,7	10,5	9,9	32,8
		180	12,8	11,3	10,5	10,2	33,8
PD	A/M	0	16,4	11,6	8,8	8,4	31,2
		180	19,9	14,3	9,6	8,1	33,6
	AV/MC	0	22,2	15,9	10,7	9,1	37,4
		180	24,3	16,7	11,7	9,2	39,5
			<i>C na fração leve</i>				
Campo nativo			1,65	0,53	0,62	0,38	1,92
PC	A/M	0	a 0,50 B ⁵	^{NS} 0,35 ^{NS}	b 0,30 ^{NS}	^{NS} 0,31 ^{NS}	b 1,06 B
		180	a 0,82 B	0,48	b 0,43	0,40	b 1,47 B
	AV/MC	0	a 1,02 B	0,40	a 0,32	0,38	a 1,40 B
		180	a 1,34 B	0,70	a 0,51	0,48	a 1,92 B
PD	A/M	0	b 1,28 A	0,88	b 0,35	0,25	b 1,49 A
		180	b 2,43 A	0,80	b 0,38	0,29	b 1,97 A
	AV/MC	0	a 3,31 A	1,00	a 0,43	0,27	a 2,38 A
		180	a 3,86 A	1,32	a 0,56	0,33	a 2,91 A

¹ PC: preparo convencional, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

³ Análise estatística foi apresentada no capítulo 5.1.

⁴ Dados obtidos de Lovato et al. (2004).

⁵ Letras maiúsculas na coluna comparam os sistemas de preparo do solo dentro de cada sistema de cultura e dose de N e letras minúsculas na coluna comparam os diferentes sistemas de cultura dentro de cada sistema de preparo e dose de N, através do teste de Tukey ($P < 0.05$).

Os maiores índices de estoque de C foram observados no solo em sistema PD (Tabela 4 e Figura 6a), o que decorreu da menor oxidação biológica do C orgânico (Bayer et al. 2000a; Bayer et al., 2006b) e maior proteção física da MOS nos agregados estáveis do solo. Os agregados atuam como barreiras físicas que impedem a ação direta das enzimas microbianas sobre a MOS e diminuem a disponibilidade de O₂ para a atividade microbiana (Sollins et al, 1996; Six et al., 1999 Krull et al., 2003), favorecendo assim o acúmulo de C no solo.

TABELA 4. Índice de estoque de C (IEC), labilidade (L), índice de labilidade do C (ILC) e índice de manejo do C (IMC) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo sob campo nativo e submetido a diferentes sistemas de manejo

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Dose N (kg ha ⁻¹)	IEC	L	ILC	IMC
Campo nativo ⁴			1,00	0,045	1,00	100
PC	A/M	0	b 0,62 B*	b 0,040 B*	b 0,89 A*	b 55 B*
		180	b 0,67 B	b 0,052 B	b 1,16 A	b 78 B
	AV/MC	0	a 0,73 B*	a 0,045 B*	a 1,00 A*	a 73 B*
		180	a 0,76 B	a 0,062 B	a 1,37 A	a 104 B
PD	A/M	0	b 0,70 A*	b 0,050 A*	b 1,11 A*	b 78 A*
		180	b 0,75 A	b 0,062 A	b 1,37 A	b 103 A
	AV/MC	0	a 0,84 A*	a 0,068 A*	a 1,51 A*	a 127 A*
		180	a 0,88 A	a 0,080 A	a 1,78 A	a 157 A

¹ PC: preparo convencional, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

³ Letras maiúsculas na coluna comparam sistemas de preparo do solo dentro dos sistemas de cultura e dose de N e letras minúsculas na coluna antes do valor comparam sistemas de cultura dentro dos sistemas de preparo e dose de N, através do teste de Tukey 5%. Para comparar o efeito da adubação nitrogenada uso-se a simbologia *, representando diferenças entre as doses de N dentro dos sistemas de preparo e culturas.

O efeito dos sistemas de culturas no IEC foi relacionado ao aporte de resíduos vegetais ao solo, o qual foi maior em sistemas com leguminosas e/ou adubação nitrogenada. O solo no sistema de cultura AV/MC apresentou o maior IEC, em ambos os sistemas de preparo de solo (Figura 6a), o que reforça a significativa contribuição das leguminosas para o acúmulo de C em solos subtropicais sob PD (Burle et al., 1997; Lovato et al., 2004; Sisti et al., 2004). A adubação nitrogenada aumentou o IEC em todos os sistemas de manejo avaliados. A inclusão de leguminosas no sistema de cultura contribuiu para o aumento do IEC mais eficientemente do que a adubação nitrogenada (Tabela 4). A presença de leguminosas (vica+caupi) promoveu aumento de 15% no IEC do solo sob sistema A/M, enquanto a aplicação de 180 kg N ha⁻¹ no sistema A/M aumentou o IEC em apenas 7%. Dois fatores podem contribuir para este comportamento, primeiro uma maior eficiência de acúmulo de C nos sistemas com leguminosas, possivelmente em decorrência do acúmulo de N no solo e segundo, um efeito positivo do N mineral na atividade microbiana no solo (*priming effect*), intensificando a mineralização da MOS (Conde et al., 2005).

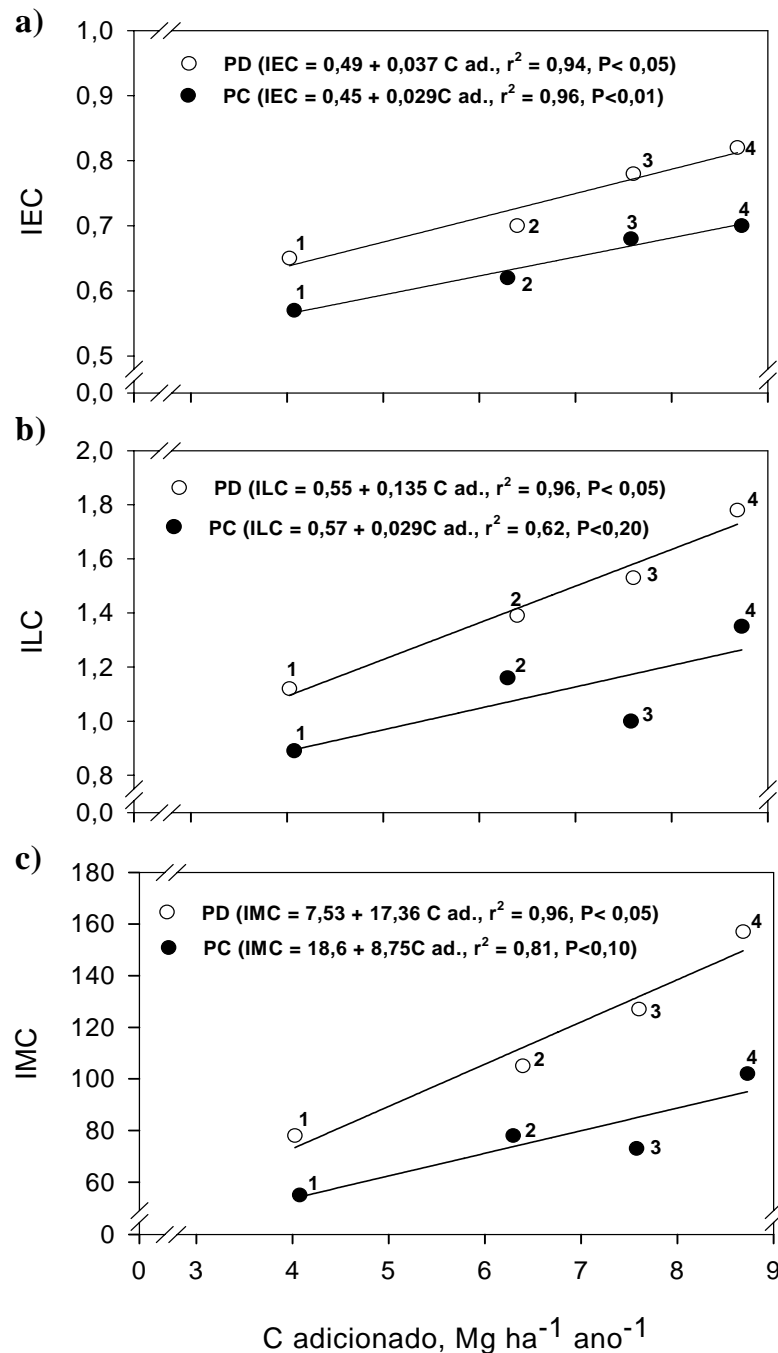


FIGURA 6. Relação entre o C adicionado anualmente pelos sistemas de cultura e o Índice de estoque de carbono: IEC (a) índice de labilidade do carbono: ILC (b) e índice de manejo do carbono: IMC (c) na camada de 0-0,2 m de um Argissolo submetido a sistemas de manejo do solo (PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) em duas doses de N (0 e 180 $kg \text{ ha}^{-1}$). 1: aveia+milho 0 $kg \text{ N ha}^{-1}$; 2: aveia /milho 180 $kg \text{ N ha}^{-1}$; 3: aveia+vica/milho+caupi 0 $kg \text{ N ha}^{-1}$ e 4: aveia+vica/milho+caupi 180 $kg \text{ N ha}^{-1}$.

5.2.3.2. Labilidade e índice de labilidade do C

Na FL da MOS, os estoques de C orgânico variaram entre 1,06 a 2,91 Mg ha⁻¹, correspondendo de 3 a 8% do C orgânico total (Tabela 3). A maior proporção de C na FL no solo em PD determinou maior labilidade do C neste sistema de preparo em comparação ao sistema PC (Figura 6b, 7). A deposição dos resíduos vegetais na superfície do solo em PD promoveram maior labilidade nas camadas superficiais do solo em comparação ao solo em PC (Figura 7). Por outro lado, quando os resíduos vegetais foram incorporados no solo pelas operações de preparo, uma maior labilidade foi verificada na camada de 0,1-0,2 m no sistema PC, se comparado ao solo em PD. Entretanto, a magnitude das diferenças entre os sistemas de preparo foram sensivelmente menores em subsuperfície quando comparados com a camada superficial do solo (Figura 7). Em virtude disto, o efeito positivo do PD na superfície do solo sobre a labilidade do C, foi mantido quando avaliou-se a camada de 0-0,2m (Tabela 4).

A labilidade do C na camada de 0-0,2m foi maior no solo em PD quando comparado ao solo em PC (Tabela 4). A maior proteção física da MOS no sistema PD (Sollins et al, 1996; Krull et al., 2003) favoreceu uma maior proporção de C lábil em comparação ao C total, aumentando o índice de estoque e a labilidade do C no solo, semelhante ao que Blair et al. (1995) obteve para solos australianos. Os autores observaram que o não distúrbio do solo pelo manejo promoveu maior proporção de C lábil e por consequência maior labilidade do C.

O índice de labilidade de C relacionou-se com a adição de C pelos sistemas de cultura (Figura 6b). A maior labilidade ocorreu no solo sob o sistema AV/MC, sendo substancialmente maior nas camadas superficiais do solo (Figura 7). Quando comparado ao sistema A/M, a labilidade do C no sistema AV/MC foi em média 40% maior na superfície do solo e foi similar em subsuperfície. Os estudos conduzidos por Blair et al., (1995), Diekow et al. (2005b) e Salton (2005), comparando solos cultivados com a inclusão de leguminosas também demonstraram aumentos significativos na labilidade e no índice de labilidade de C destes sistemas.

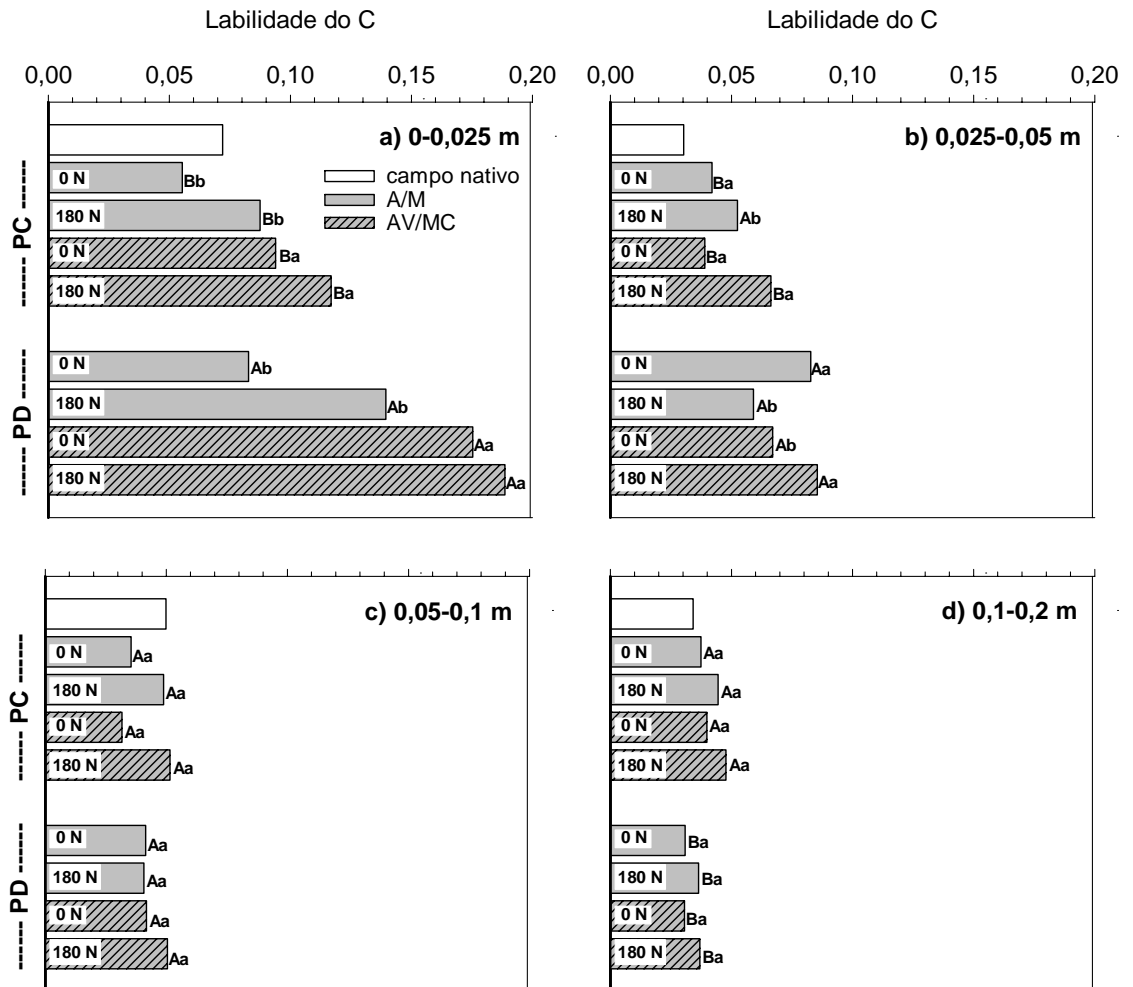


FIGURA 7. Labilidade do C nas camadas de um Argissolo Vermelho conduzido à 18 anos sob diferentes sistemas de preparo e de culturas em duas doses de N mineral (0 e 180 kg N ha⁻¹). PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi. Letras maiúsculas comparam sistemas de preparo do solo dentro do mesmo sistemas de cultura e dose de N e as letras minúsculas comparam sistemas de cultura dentro do mesmo sistemas de preparo e dose de N, através do teste de Tukey a 5%.

O índice de labilidade do C (ILC) na camada de 0-0,2 m variou entre 0,89 e 1,78 (Tabela 4). Observou-se que o menor revolvimento do solo, a inclusão de leguminosas e a adubação nitrogenada contribuíram para o aumento do ILC dos sistemas de manejo do solo. Os ILCs foram consideravelmente maiores no solo em PD, independente do sistema de cultura e adubação nitrogenada. O efeito do ambiente menos oxidativo em PD determinando maior proteção física da MOS foi fator preponderante no

aumento dos ILC. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por De Bona (2005) em experimento em área próxima

No sistema AV/MC foi observado ILC aproximadamente 15 a 30 % superior ao ILC do sistema A/M, o que pode ser explicado pela relação positiva com a adição de C ao solo pelos sistemas de culturas (Figura 6b). A maior diversidade de culturas na sucessão e a presença de leguminosas aumenta a adição de C e favorece a labilidade e o estoque de C no solo, principalmente em solos sob PD. Em estudo desenvolvido por Blair et al. (1995), no qual a diversidade de culturas na rotação aumentou incluindo uma leguminosas de verão (leucena), os autores verificaram aumento no ILC superior a 35% em comparação a rotação menos diversificada.

A adubação nitrogenada também contribuiu para o aumento do ILC dos sistemas de manejo. Quando o solo foi cultivado com a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N na cultura do milho, foi observado um acréscimo de 20 e 15%, respectivamente para os sistemas de cultura A/M e AV/MC em PD, em comparação a não aplicação de N. Similar ao que observou-se para o IEC, a resposta a aplicação de N sob o ILC foi menor no sistema AV/MC do que no sistema A/M. Diekow et al. (2005b) também observaram maior ILC nos sistemas adubados com N mineral, todavia a resposta dos sistemas com leguminosas à aplicação de N mineral quanto ao ILC foi similar a dos sistemas exclusivamente com gramíneas.

O ILC foi mais sensível em detectar as diferenças no manejo do solo do que o IEC, uma tendência também verificada em outros estudos conduzidos em regiões tropicais e subtropicais (Whitbread et al. 2000; Leite et al. 2003; De Bona 2005). A mesma quantidade de resíduos vegetais aportado ao solo em PC e PD, correspondeu a um aumento 5 vezes maior no ILC do solo em PD (Figura 6), enquanto no IEC o aumento foi inferior a duas vezes. A dinâmica da fração leve da MOS, a qual determina a labilidade do C, pode explicar em grande parte estas diferenças. Como o C da FL é realimentado pela adição sistemática de resíduos vegetais ao solo e possui elevados teores de compostos facilmente decomponíveis (Skjemstad et al., 1986), a taxa de reciclagem é maior do que do solo inteiro, e portanto, as alterações nos estoques de C da FL são relativamente mais rápidas se comparado ao solo inteiro. Em concordância, estudos conduzidos no Sul do Brasil, num solo

inicialmente em solo degradado, que passou a ser manejado em plantio direto com sistema guandu+milho, verificaram que o ILC aumentou 1,5 vezes mais do que o IEC no período de 17 anos (Diekow et al., 2005b).

5.2.3.3. Índice de manejo de carbono

Como reflexo do efeito dos sistemas preparo do solo no IEC e no ILC, os maiores IMC foram observados no solo em plantio direto (Tabela 4, Figura 6c). Em média, o solo sob PD apresentou IMC 28 e 39% maior se comparado ao solo em PC, para A/M e AV/MC, respectivamente. Entre os sistemas de culturas, o sistema AV/MC apresentou os maiores IMC, principalmente quando combinada a aplicação de N mineral na cultura do milho (Tabela 4). A aplicação de adubação nitrogenada resultou em aumentos no IMC maiores no sistema PC do que no sistema PD. Este menor efeito observado no sistema PD em resposta a aplicação de N pode estar relacionado ao maior estoque de nitrogênio total no solo sob este sistema (dados não apresentados), o que diminuiu a resposta das culturas ao N mineral.

O aporte de resíduos vegetais ao solo e o menor revolvimento foram fatores determinantes da qualidade do manejo do solo (Figura 6c). Sistemas de manejo com maior qualidade recuperam a condição inicial de campo nativo (IMC=100) e obtiveram IMC até mesmo superior a 150 (Tabela 4). Outros sistemas com revolvimento e baixa adição de resíduos vegetais não demonstraram-se tão eficientes na recuperação, e portanto, apresentam menor qualidade. Portanto, a adoção do sistema PD como prática de manejo eficiente para controlar a degradação acelerada dos solos na região subtropical e tropical, deve ser acompanhada por sistemas de culturas que apórtam anualmente quantidades significativas de C ao solo. Trabalhos recentes que utilizaram o IMC como indicador de qualidade de sistemas de manejo, verificaram que a adição de C ao solo sempre esteve relacionada positivamente com o IMC (Salton, 2005; Diekow et al., 2005b).

Uma outra importante relação observada com o IMC foi obtida com propriedades emergentes do sistema (Tabela 5). Segundo Vezzani (2001), as propriedades emergentes do sistema são a expressão de qualidade do solo. Em outras palavras, é a capacidade do solo exercer suas funções na natureza

(Doran, 1997). Altos valores de IMC indicaram maior qualidade do sistema de manejo e refletiram-se em melhorias da qualidade física (DMP), biológica (C microbiano, C – CO₂ e NPM) e química (CTC pH 7,0) do solo em estudo. O aumento do estoque e da labilidade do C, os quais constituem o IMC, contribuíram para o aumento dos fluxos de C e energia entre os subsistemas mineral e biológico. O aumento dos fluxos de C e energia no sistema favorece a auto-organização do sistema solo em níveis de ordem mais avançados (Vezzani, 2001), o que irá se refletir no surgimento de propriedades emergentes do solo.

TABELA 5. Correlação entre o índice de manejo de C (IMC) e propriedades do solo

Propriedade do solo	IMC		
	equação	r	P<
C microbiano ¹	37,46 + 1,34 IMC	0,95	0,040
C – CO ₂ ¹	-60,48 + 2,61 IMC	0,96	0,030
NPM ¹	-1,56 + 0,14 IMC	0,99	0,002
DMP ²	3,11 + 0,0075 IMC	0,73	0,050
CTC pH 7,0 ³	9,34 + 0,015 IMC	0,91	0,001

¹ Conceição et al. (2005). NPM: nitrogênio potencialmente mineralizável.

² Conceição et al. (2004). DMP: diâmetro médio ponderado de agregados.

³ Zanatta (2005) (dados não publicados). CTC: capacidade de troca de cátions.

Estes resultados reforçam a adequação do IMC, que engloba estoque e labilidade da MOS, na avaliação da qualidade do manejo, bem como do uso da fração leve da MOS, na estimativa da labilidade da MOS. Os resultados sugerem ainda que o sistema PD combinado a sistemas de culturas baseados em altas adições de C promovem a qualidade do solo em regiões subtropicais, por aumentar os fluxos de C e energia no solo.

5.2.4. Conclusões

1. A adoção de sistemas de preparo conservacionista do solo, associados a sistemas de culturas com elevada adição de resíduos vegetais constituem-se estratégias para promover o aumento dos estoques de C orgânico na fração leve da MOS.

2. A labilidade do C foi maior nos sistemas conservacionistas de manejo do solo, e se mostrou mais sensível do que o estoque de C às alterações no manejo do solo.
3. O IMC foi sensível para avaliar a qualidade dos sistemas de manejo do solo, evidenciando que sistemas de manejo com menor revolvimento e maior aporte de resíduos tem maior qualidade.
4. As diferenças na qualidade do manejo evidenciadas pelo IMC expressaram-se em mudanças da qualidade química, física e biológica do solo.

5.3. ESTUDO III: Carbono orgânico extraível em água e características espectroscópicas da matéria orgânica dissolvida em sistemas de manejo do solo

5.3.1. Introdução

O carbono orgânico extraível em água (COEA) representa uma fração pequena da matéria orgânica do solo (MOS) mas apesar disso, está envolvido em vários processos químicos e biológicos importantes, como a dinâmica do fluxo de gases do efeito estufa (Sollins & Jandl, 1997; Glatzel et al., 2003), o transporte de metais e poluentes orgânicos (McCrea, 1986) e a disponibilidade de nutrientes no solo (Raulund-Rasmussen et al., 1998). Entretanto, as pesquisas relacionadas a dinâmica do COEA no solo ainda são incipientes e referem-se, principalmente, a sistemas florestais e aquáticos.

A influência dos sistemas de manejo do solo sob a dinâmica do COEA em regiões tropicais e subtropicais é praticamente desconhecida. Alguns trabalhos de pesquisa sobre a dinâmica do COEA com ênfase agrícola foram desenvolvidos em regiões temperadas, porém com resultados contrastantes e não conclusivos. Em solos cultivados com milho, Cannavo et al. (2004) observaram teores de COEA que variaram de 2 a 9 mg L⁻¹, enquanto Delprat et al. (1997) determinaram teores de 62 a 94 mg L⁻¹ de COEA, os quais diminuíram com o tempo de cultivo de milho, proporcionalmente a perda de C orgânico total no solo.

A perda de C orgânico no solo e, conseqüentemente, a redução dos teores de COEA em ambientes agrícolas está relacionada principalmente ao excessivo revolvimento do solo e a baixa adição de resíduos vegetais em comparação a solos de florestas (Linn & Doran, 1984). No entanto, Gregorich et al. (2000) observaram maiores concentrações de COEA no solo onde os resíduos vegetais foram incorporados ao solo, sugerindo que a ativação da microbiota pelo preparo do solo estimula a mineralização da MOS e a produção de COEA. Em adição, Leinweber et al. (1995) e Kalbitz (2001) observaram que o aumento da intensidade de mobilização do solo alterou também a composição química da matéria orgânica dissolvida (MOD).

O conteúdo de COEA e a composição química da MOD podem também ser influenciados pela natureza e pela quantidade dos resíduos vegetais adicionados ao solo, os quais diferem consideravelmente em ambientes agrícolas. Em experimentos de campo, Chantigny et al. (1997) observaram que as concentrações de COEA foram superiores no solo cultivado com leguminosas em comparação a solos cultivados exclusivamente com gramíneas. Os autores relacionaram os maiores teores de COEA à maior capacidade exsudativa das leguminosas, como forma de estimular a fixação biológica de N. No entanto, isto também pode estar relacionado com o fato das leguminosas contribuírem positivamente para a adição e o acúmulo de C nos solos (Lovato et al., 2004; Sisti et al., 2004; Zanatta et al. 2006).

As mudanças qualitativas na MOD estão relacionadas principalmente a alterações químicas e estruturais (Delprat et al., 1997), as quais se refletem no grau de recalcitrância da MOD. Estas alterações podem ser avaliadas por técnicas espectroscópicas, como a espectroscopia de fluorescência e a espectroscopia na região do ultravioleta-vísivel – UV-Vis. Embora, a literatura sobre a utilização destas técnicas, seja quase que restrita ao estudo com substâncias húmicas, acredita-se que seja possível avaliar as alterações relacionadas a recalcitrância molecular da MOS por análise espectroscópica da MOD (Kalbitz, 2001; Ohno, 2002; Cannavo et al., 2004).

O fenômeno de fluorescência e absorção de luz na região do ultravioleta visível é proporcionado pela presença de sistemas conjugados insaturados e cromóforos, respectivamente, os quais emitem luz quando os elétrons excitados voltam ao orbital estável (Senesi et al., 1991). A intensidade de luz fluorescente emitida é proporcional a presença dos sistemas conjugados e de cromóforos, e ambos estão presentes em maior abundância em materiais orgânicos recalcitrantes (Miano & Senesi, 1992), fluorescendo com maior intensidade em comprimentos de onda longos.

Em estudos com fluorescências em solução de ácidos húmicos, Bayer et al. (2002a,b) e Milori et al. (2002) identificaram maior recalcitrância molecular da MO em solos manejados em PC, devido principalmente a maior taxa de decomposição da MOS, em relação aos solos sob PD. Em estudos com MOD de 98 solos, Cannavo et al. (2004) observaram uma diminuição da recalcitrância no perfil do solo, por ocasião da incorporação do resíduo de

milho fresco na camada de 0-0,2m. A absorção de luz na região do UV-Vis em amostras de MOD extraída de solos cultivados intensivamente foram consideravelmente maiores do que aquelas medidas em soluções extraídas de solos sob vegetação natural. A maior decomposição da matéria orgânica desses solos devido ao excessivo manejo, está associada ao aumento do grau de recalcitrância da MOD (Kalbitz, 2001).

Baseados neste contexto, elaborou-se as seguintes hipóteses para este estudo:

- os sistemas com menor mobilização do solo e o maior aporte de resíduos vegetais aumentam a concentração do COEA;
- as técnicas espectroscópicas de fluorescência e absorção de luz na região do ultravioleta-visível permitem obter informações sobre a recalcitrância da MOD;
- os sistemas com menor mobilização do solo e o maior aporte de resíduos vegetais reduzem a recalcitrância da MOS e MOD;

Para avaliar estas hipóteses, elaborou-se os seguintes objetivos:

- avaliar a concentração de COEA obtida em solo cultivado em plantio direto e preparo convencional combinados com diferentes sistemas de culturas;
- avaliar qualitativamente a MOD por espectroscopia de fluorescência e na região do ultravioleta visível;
- comparar a recalcitrância da MOD por análise de fluorescência e absorção de luz na região UV-Vis, com a recalcitrância da MOS obtida por amostras de solo inteiro com fluorescência induzida por laser.

5.3.2. Material e Métodos

5.3.2.1. Experimento de campo e coleta de amostra de solo

As informações referentes ao experimento de campo e os procedimentos de coleta e preparo das amostras de solo foram descritas no Material e Métodos Geral (capítulo 4).

5.3.2.2. Tratamentos e camadas de solo avaliadas

Para este estudo avaliou-se os sistemas de preparo do solo PD e PC, nos sistemas de cultura A/M, V/M e AV/MC sem adubação nitrogenada. As camadas avaliadas foram: 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m. As amostras de solo inteiro foram analisadas por espectroscopia de fluorescência induzida por laser (Milori et al., 2006).

5.3.2.3. Fluorescência induzida por laser em amostras de solo inteiro

A fluorescência induzida por laser foi realizada nas amostras de solo inteiro, as quais foram finamente moídas em gral de ágata. As amostras foram individualmente arranjadas na janela de quartzo para a análise de fluorescência. A fluorescência de excitação foi feita através de laser de argônio, o qual incidiu sobre a superfície da amostra de solo promovendo a excitação dos elétrons. A amostra de solo emitiu fluorescência que foi medida por um monocromador na região de 0 a 180 nm de comprimento de onda. O índice de recalcitrância foi obtido pela integral da área sob o espectro dividido pelo teor de C da amostra de solo (Milori et al., 2006). Este procedimento foi utilizado como padrão nas comparações entre as metodologias utilizadas na obtenção da recalcitrância da MOD.

5.3.2.4. Extração da MOD e determinação do COEA

A MOD foi extraída a partir de uma suspensão de 5 g de solo e 50 mL de água destilada (1:10 de solo:água). A suspensão foi agitada horizontalmente durante 10 h em frascos “snap-cap” e posteriormente decantada por 14 h (uma noite). O sobrenadante foi centrifugado a 1360g por 15 minutos e filtrado em membrana de celulose regenerada com porosidade <0,45 µm, por ação de vácuo obtido em seringas descartáveis de 60 mL. O filtrado foi analisado quanto ao teor de carbono orgânico extraível em água pelo método de combustão seca e determinação do CO₂ gerado por detector de infravermelho, em analisador Shimadzu (TOC-V CSH).

5.3.2.5. Espectroscopia de fluorescência e na região do ultravioleta visível na MOD

As análises espectroscópicas de fluorescência e na região do ultravioleta-visível foram realizadas no Laboratório de Ótica, na Embrapa Instrumentação Agropecuária em São Carlos, SP, sob a supervisão da pesquisadora Débora M.B.P. Milori. As amostras de MOD foram diluídas para 10 mg L⁻¹ de COEA com água deionizada, seguidas de medição do pH (Apêndice 8) e analisadas por espectroscopia de fluorescência e na região do ultravioleta-visível.

A análise de fluorescência foi realizada num aparelho Perkin Elmer LS 50B, produzindo espectros de emissão e síncronos. Os espectros de emissão da MOD foram obtidos com excitação em 240 nm e 465 nm. Os espectros de emissão em 240 nm foram medidos numa faixa de 300 a 600 nm de comprimento de onda. A emissão total do espectro foi dividida em quatro regiões e o grau de recalcitrância foi calculado através da relação do último quarto (525-600 – A₄) pelo primeiro quarto (300-375 – A₁) (Zsolnay et al., 1999). Os espectros de emissão em 465 nm foram medidos numa variação de 475 a 750 nm de comprimento de onda e o grau de recalcitrância foi obtido pela integração da área sob o espectro (Milori et al., 2002). Os espectros de síncronos foram medidos de 220 a 650 nm de comprimento de onda. O grau de

recalcitrância foi obtido pela relação entre picos característicos no comprimento de onda longo (465nm) e curto (345 nm), respectivamente (Kalbitz et al., 1999).

A fluorescência na região do ultravioleta-visível foi medida na faixa 200 a 800 nm de comprimento de onda, num espectrofotômetro de absorção. O índice de recalcitrância foi obtido pela razão entre a absorbância em 465 e 665 nm (E_4/E_6) (Chen et al., 1977). A absorbância em 285 nm, selecionada pela relação direta que apresenta com o caráter aromático das substâncias húmicas (Kalbitz et al., 1999), também foi considerado como um índice de recalcitrância da MOD.

5.3.2.6 – Análise estatística

Os efeitos dos tratamentos no C orgânico extraível em água foram avaliados pela análise de variância e a diferença entre médias de tratamentos pelo teste de Tukey a 5 %. A relação entre variáveis foi avaliada pela significância dos coeficientes de correlação de regressões polinomiais.

5.3.3. Resultados e discussão

5.3.3.1. Teores e estoques de C orgânico extraível em água

As concentrações de COEA variaram de 16,6 a 41,5 mg L⁻¹ (Tabela 6), sendo semelhante aos valores que Delprat et al. (1997) reportaram para solos cultivados com milho. O solo em PD apresentou maiores teores de COEA do que o solo em PC na camada de 0-0,05m (Tabela 6). Todavia, abaixo de 0,05 m, o sistema de preparo não teve efeito nas concentrações de COEA. Considerando que a dinâmica do COEA foi estreitamente relacionada com o C orgânico do solo (Figura 8b), o impacto das práticas de manejo, as quais alteram a adição de C e o estoque de C orgânico do solo, refletem-se sob as concentrações de COEA. No PD, devido ao menor revolvimento do solo em comparação ao sistema PC e a maior proteção do C lábil, as taxas de decomposição da MOS são reduzidas, contribuindo para o acúmulo de C no solo e, por consequência, proporciona aumentos nos estoques de COEA (Figura 8b e Tabela 6). Estes resultados estão de acordo com os reportados

por McDowell & Likens (1988), Zsolnay (1996), através dos quais a principal fonte de COEA é a matéria orgânica do solo.

TABELA 6. Teores e estoques de C orgânico extraível em água (COEA) de um Argissolo submetido a sistemas de manejo do solo durante 18 anos

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	profundidade, m				
		0-0,025	0,025-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0-0,2
		mg L ⁻¹				Mg ha ⁻¹
PC	A/M	16,6	20,0	21,5	20,9	0,64
	V/M	24,1	29,0	22,9	19,7	0,70
	AV/MC	25,9	25,1	21,8	23,8	0,74
PD	A/M	27,3	27,4	21,6	20,9	0,72
	V/M	37,8	32,9	24,2	19,3	0,77
	AV/MC	41,5	36,9	26,5	19,5	0,82
<i>Média sistemas preparo³</i>						
	PC	22,2 b	24,7 b	22,1 ^{NS}	21,5 ^{NS}	0,70 b
	PD	35,5 a	32,4 a	24,1	19,9	0,77 a
<i>Média sistemas cultura³</i>						
	A/M	21,9 b	21,7 b	21,6 ^{NS}	20,9 ^{NS}	0,68 b
	V/M	30,9 a	30,9 a	23,5	19,5	0,73 ab
	AV/MC	33,7 a	31,0 a	24,1	21,7	0,79 a

¹ PC: preparo convencional, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

³ Médias na mesma coluna seguidas por mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($P < 0.05$).

Outros estudos também verificaram o efeito do sistema de preparo do solo sobre o estoque de COEA. Linn & Doran (1984) observaram maior estoque de COEA no sistema PD se comparado ao solo em PC até a camada de 0,075m. Todavia Gregorich et al. (2000) constataram maiores estoques de COEA em solos onde os resíduos vegetais foram incorporados ao solo, sugerindo que o preparo do solo estimula a degradação microbiana dos resíduos e contribui para a produção de COEA. Certamente este efeito pode ser observado no solo num curto período de tempo após o preparo, como foi demonstrado por Glatzel et al. (2003). Os autores observaram que apesar das concentrações de COEA no solo serem inicialmente maiores em PC do que em PD, esta diferença persistiu apenas alguns dias após o revolvimento do solo. Após, as concentrações de COEA estabilizaram-se em valores proporcionais

aos conteúdos de C orgânico no solo. Desta forma, é importante ter bem claro que o COEA é sensível a alterações induzidas a curto prazo por fatores abióticos, os quais devem ser levados em consideração no momento da interpretação dos resultados (Cannavo et al., 2004). Cabe salientar que neste estudo, a amostragem do solo ocorreu anterior aos preparos do solo, e portanto, o efeito verificado decorre de aproximadamente um ano sem revolvimento do solo. Por outro lado, o manejo das culturas de inverno com rolo-faca e dessecação com herbicida haviam sido executados a duas semanas.

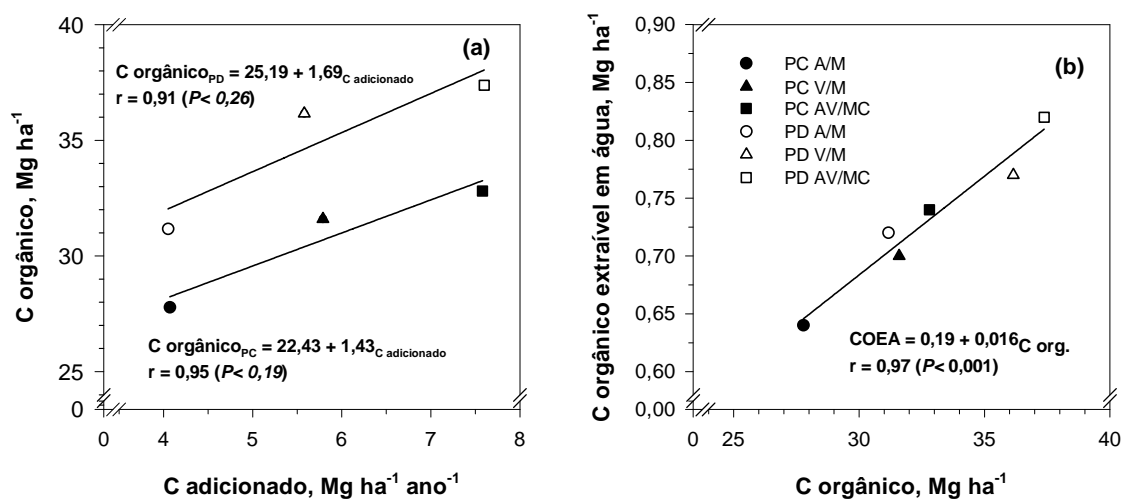


FIGURA 8. Efeito da adição de C ao solo sobre o estoque de C orgânico do solo (a) e do estoque de C orgânico do solo sobre o conteúdo de carbono orgânico extraível em água (b) no solo em PC (preparo convencional) e PD (plantio direto). A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Como efeito das maiores concentrações de COEA, o sistema PD apresentou o maior estoque de COEA na camada de 0-0,2 m (Tabela 6). Na média dos sistemas de cultura, o estoque em PD foi 10% maior (77 kg ha⁻¹) se comparado ao PC (70 kg ha⁻¹). Valores próximos foram determinados por Linn & Doran (1984) como sendo a diferença entre PD e PC em solos da região temperada (32 a 84 kg ha⁻¹).

As concentrações de COEA no solo sob AV/MC e V/M foram maiores do que sob A/M (Tabela 6). A presença de espécies leguminosas no

sistema de culturas contribuiu para o aumento da concentração de COEA, principalmente por promover incrementos significativos no aporte de resíduos vegetais pelas culturas e também no acúmulo de C orgânico no solo (Figura 8a,b). Além disso, outros trabalhos tem reportado incrementos nas concentrações de COEA de solos cultivados com leguminosas, porém isto tem sido relacionado a maior capacidade exsudativa das leguminosas, a fim de sinalizar a sua presença às bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico no solo (Chantigny et al., 1997).

A inclusão de leguminosas nos sistemas de culturas representou um aumento médio de 14% (110 kg ha^{-1}) no estoque de COEA do sistema AV/MC em relação ao sistema A/M (Tabela 6). Num dos poucos trabalhos com COEA em condições tropicais, Mazzarino et al. (1993) também constataram incrementos no estoque de COEA ($2 \text{ a } 44 \text{ kg ha}^{-1}$) pela inclusão de leguminosas em rotação ao trigo. Por outro lado, Gregorich et al. (2003) determinaram os maiores estoques de COEA (570 mg kg^{-1}) sob a monocultura de milho, enquanto a inclusão de soja na rotação não representou aumentos no COEA (419 mg kg^{-1}). Mesmo sendo a soja uma leguminosa fixadora de N atmosférico em simbiose com bactérias, neste estudo a elevada capacidade exsudativa da soja não parece ser o fator determinante do estoque de COEA no solo, mas sim a produção de resíduos vegetais, os quais são relativamente menores na soja comercial se comparado ao milho.

5.3.3.2. Caracterização da MOD por espectroscopia

Numerosos grupos funcionais encontrados na MOD são responsáveis pela emissão de luz fluorescente, tais como: carbonilas, carboxilas, fenólicos e aminas. A maioria dessas estruturas são constituídas de C, porém os grupos aminados (NH_2) não. Portanto, passar-se-á a discutir a fluorescência da MOD e não apenas do COEA.

A avaliação do solo inteiro por espectroscopia de fluorescência induzida por laser demonstrou alterações na qualidade da MOS promovida pelos sistemas de manejo (Tabela 7). As mais baixas intensidades de fluorescência foram observadas no perfil do solo em PD, evidenciando a menor recalcitrância da MOS neste sistema, quando combinado ao sistema de cultura

A/M. O sistema AV/MC também contribuiu para a redução da recalcitrância da MOS em ambos os sistemas de preparo do solo. Como a taxa de decomposição da MOS é diminuída sob PD, e considerando-se uma entrada de C semelhante, proporcionalmente mais material lábil fica no solo cultivado em PD, reduzindo assim a recalcitrância do material orgânico. O mesmo pode ser observado pela adição sistemática de resíduos vegetais ao solo em quantidades que superem o metabolismo da população microbiana, promovendo o acúmulo de grupamentos mais lábeis, predominantemente alifáticos, com baixa concentração de radicais livres semiquinonas (Bayer et al., 2002b) e baixa percentagem de carbono aromático (González-Pérez et al., 2004; Dieckow et al., 2005).

TABELA 7. Índice de recalcitrância (IR) da matéria orgânica do solo (MOS) por fluorescência induzida por laser (FIL) em solo inteiro e por análise espectroscópica da matéria orgânica dissolvida (MOD)

Preparo do solo ¹	Sistema cultura ²	Prof. (m)	MOS		MOD			
			FIL	A_4/A_1	I_{465nm}/I_{345nm}	A_{465nm}	Ab_{S285nm}	E_4/E_6
PC	A/M	0-0,025	361	0,22	0,31	12720	0,69	4,9
		0,025-0,05	406	0,28	0,22	8254	0,46	4,9
		0,05-0,1	446	0,21	0,27	12868	0,68	5,7
		0,1-0,2	436	0,20	0,28	13183	0,63	5,4
	AV/MC	0-0,025	277	0,34	0,17	3523	0,38	5,3
		0,025-0,05	315	0,29	0,16	5482	0,43	5,2
		0,05-0,1	326	0,30	0,14	4131	0,50	5,5
		0,1-0,2	349	0,22	0,22	10400	0,38	5,1
PD	A/M	0-0,025	190	0,33	0,19	5309	0,30	4,8
		0,025-0,05	280	0,33	0,23	7362	0,35	4,9
		0,05-0,1	393	0,26	0,24	9546	0,29	4,9
		0,1-0,2	426	0,27	0,18	6926	0,56	5,8
	AV/MC	0-0,025	145	0,39	0,18	3727	0,35	4,9
		0,025-0,05	202	0,40	0,18	4403	0,35	5,0
		0,05-0,1	323	0,34	0,16	4784	0,30	4,4
		0,1-0,2	398	0,19	0,34	16669	0,91	5,3

¹ PC: preparo convencional, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

A recalcitrância da MOD obtida por análise espectroscópica de fluorescência e na região do UV-Vis relacionou-se com a recalcitrância da MOS obtida por fluorescência induzida a laser em solo inteiro (Figura 9). Entretanto,

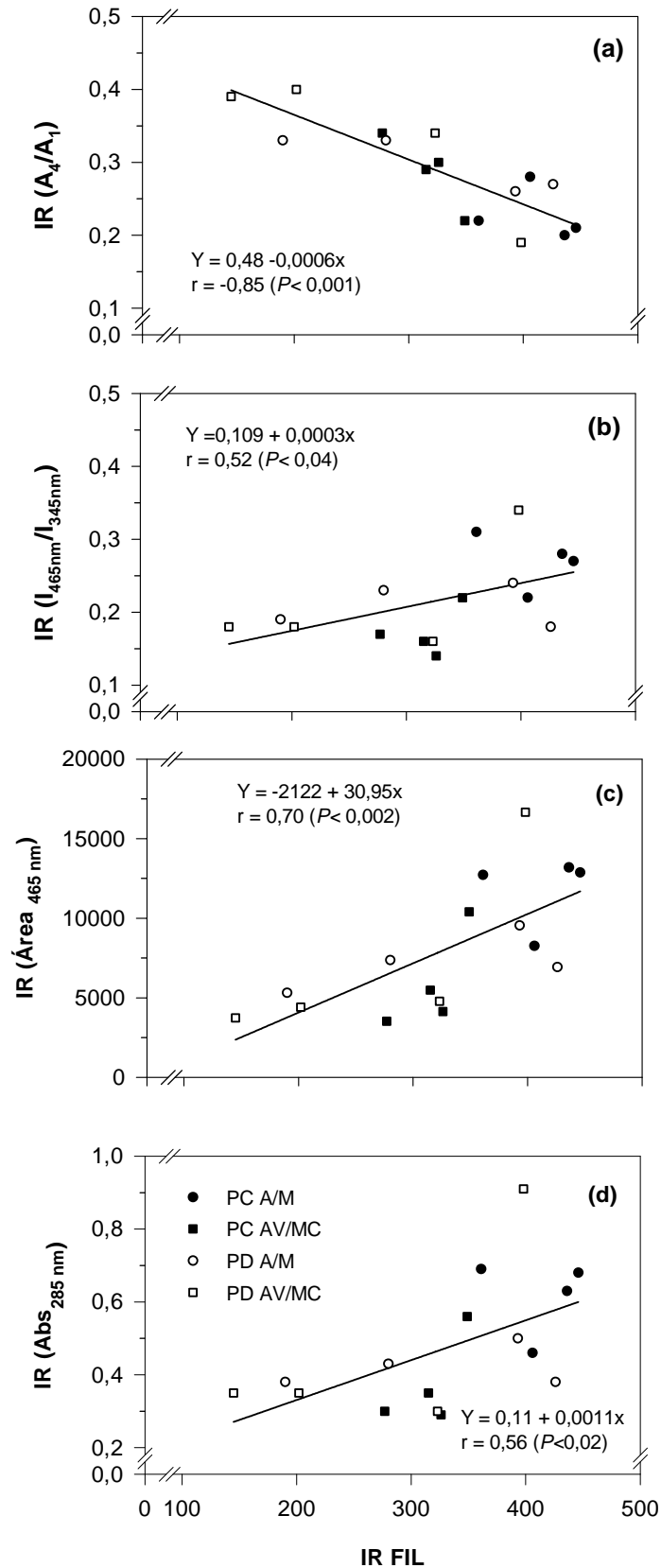


FIGURA 9. Relação do índice de recalcitrância obtido por fluorescência induzida por laser (FIL) em amostras de solo inteiro e por análise espectroscópica da MOD.

o índice de recalcitrância obtido através dos espectros de emissão em 240 nm (A_4/A_1) apresentou comportamento inverso as demais formas de obtenção deste índice (Figura 9). Ao que tudo indica, como a fluorescência de emissão em 240 nm utiliza luz no comprimento de onda ultravioleta, uma diversidade muito grande estruturas fluorescentes estariam sendo excitadas, como também estruturas lignificadas originárias dos resíduos de plantas pouco transformados, os quais emitem fluorescência em comprimentos de onda curto (Figura 10) (Milori et al., 2002; Ohno, 2002). Ao contrário, a emissão em 465 nm, utilizando luz azul para a excitação das moléculas, é mais seletivo e exclui grande parte destes grupos, apresentando inclusive um espectro mais estreito e deslocado para comprimentos de onda longos (Figura 11).

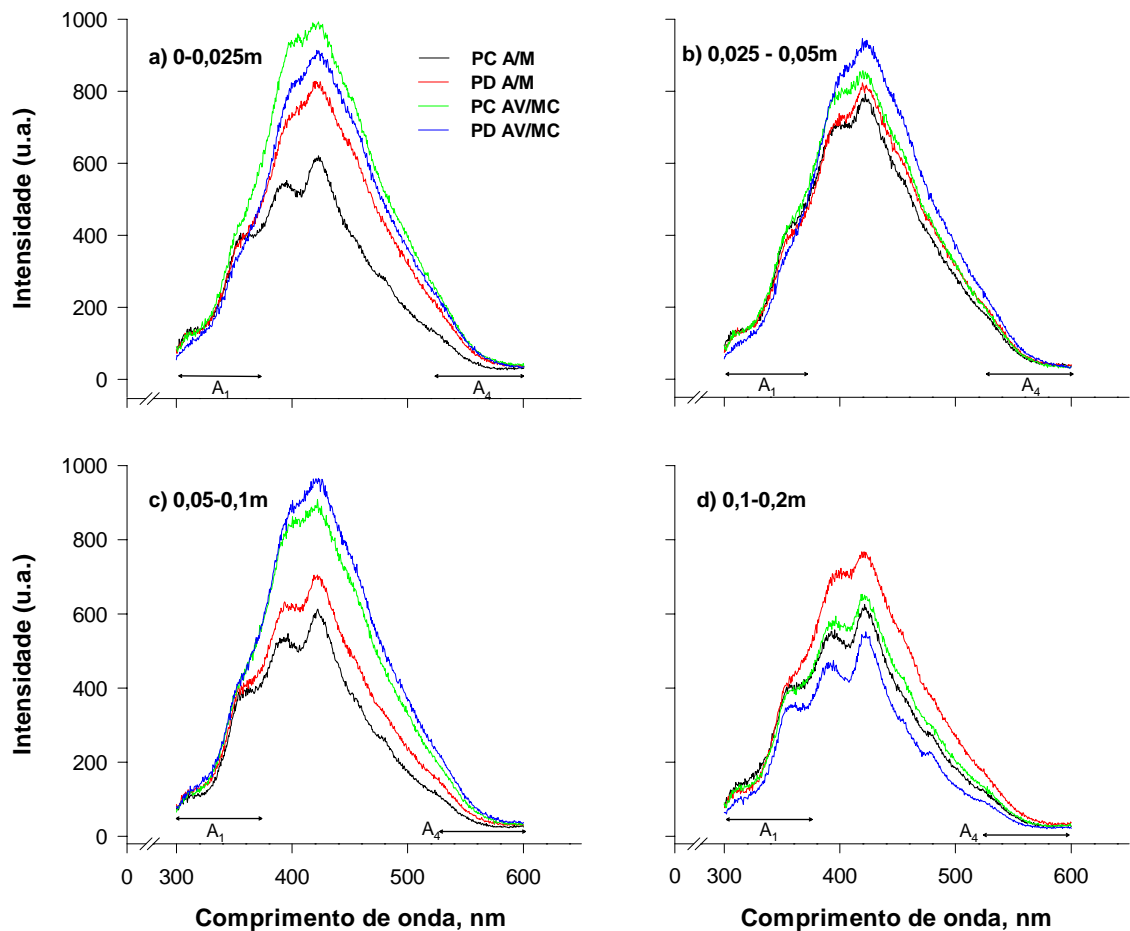


FIGURA 10. Espectros de emissão em 240 nm em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi).

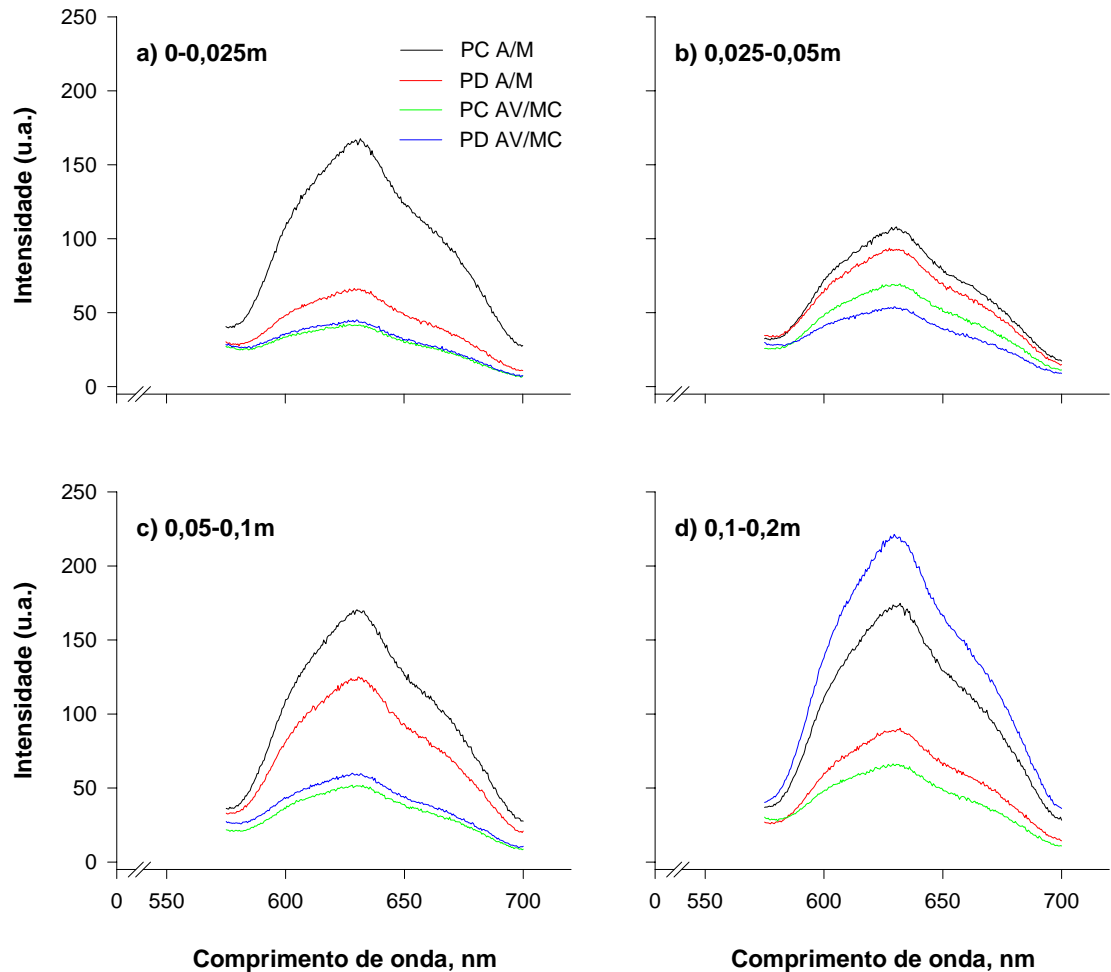


FIGURA 11. Espectros de emissão em 465nm em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi).

A avaliação da MOD por fluorescência de emissão mostrou que os diferentes sistemas de manejo apresentaram um pico principal de intensidade máxima de fluorescência relativa no comprimento de onda 425 nm (Figura 10). Outros trabalhos na literatura têm também verificado intensidade máxima de fluorescência ao redor deste comprimento de onda, tanto para ácidos húmicos (Senesi et al., 1991; Milori et al., 2002), como para MOD (Ohno, 2002; Cannavo et al., 2004). Segundo Senesi et al. (1991), as moléculas que emitem fluorescência na faixa de 410-460 nm de comprimento de onda são originárias de produtos da degradação da lignina e de outros compostos oriundos dos resíduos das plantas parcialmente decompostos. Em concordância, observa-se

na Figura 10, exceto para a camada 0,1-0,2 m, que os maiores picos de intensidade de fluorescência relativa ao redor de 410-460 nm ocorreram no sistema AV/MC, onde a adição de resíduos é maior (ver capítulo 5.1) e proporcionalmente mais abundante em compostos lignificados do que o sistema A/M (Gomes, 2006 – dados não publicados).

Utilizando o procedimento proposto por Milori et al. (2002), a área do espectro de emissão em 465 nm representa o índice de recalcitrância da MOS (A_{465nm}) (Figura 11). A área do espectro de emissão variou de aproximadamente 3500 a 16700 unidades arbitrárias (u.a.) (Tabela 7). O sistema de preparo do solo PC e o sistema de cultura A/M apresentaram as maiores áreas quando comparados ao sistema PD e AV/MC, respectivamente, até a profundidade de 0,1 m. Porém, na camada de 0,1-0,2m, observou-se maior área espectral no sistema PD AV/MC.

O espectro de síncronos comum em amostras de ácidos húmicos normalmente é composto por dois picos principais ao redor de 360 e 400nm e um ombro ao redor de 470 nm. Nos espectros de síncronos de amostras de MOD, foram observados três picos principais nos comprimentos de onda 240, 290 e 345 nm e dois ombros em 400 e 465nm (Figura 12). A presença de picos característicos, muito bem definidos em comprimentos de onda curtos (240 e 290), pode estar relacionado a estruturas fluorescentes pouco recalcitrantes, como proteínas fluorescentes (Mopper and Schultz, 1983; Mayer et al., 1999). O deslocamento da intensidade máxima de fluorescência de comprimentos de onda curtos para comprimentos de onda longos, está associado ao aumento da presença de estruturas aromáticas de alta recalcitrância (Senesi et al., 1991; Miano & Senesi, 1992) e portanto, o quociente entre a intensidade de fluorescência em 465nm e 345nm, foi considerado o índice de recalcitrância da MOD (I_{465nm}/I_{345nm}) (Tabela 7).

As amostras de MOD exibiram um característico aumento da absorbância com a redução do comprimento de onda (Figura 13). Os espectros no UV-Vis normalmente não mostram traços característicos distintos, porém podem discriminar solos submetidos a diferentes manejos ou condições naturais. Isto porque há uma relação entre a absorção de luz e a composição elementar (Kumada, 1987). Dois parâmetros são avaliados no espectro no UV-

Vis, a absorvância em 285nm e a relação entre a absorvância em 465 e 665 nm (E_4/E_6).

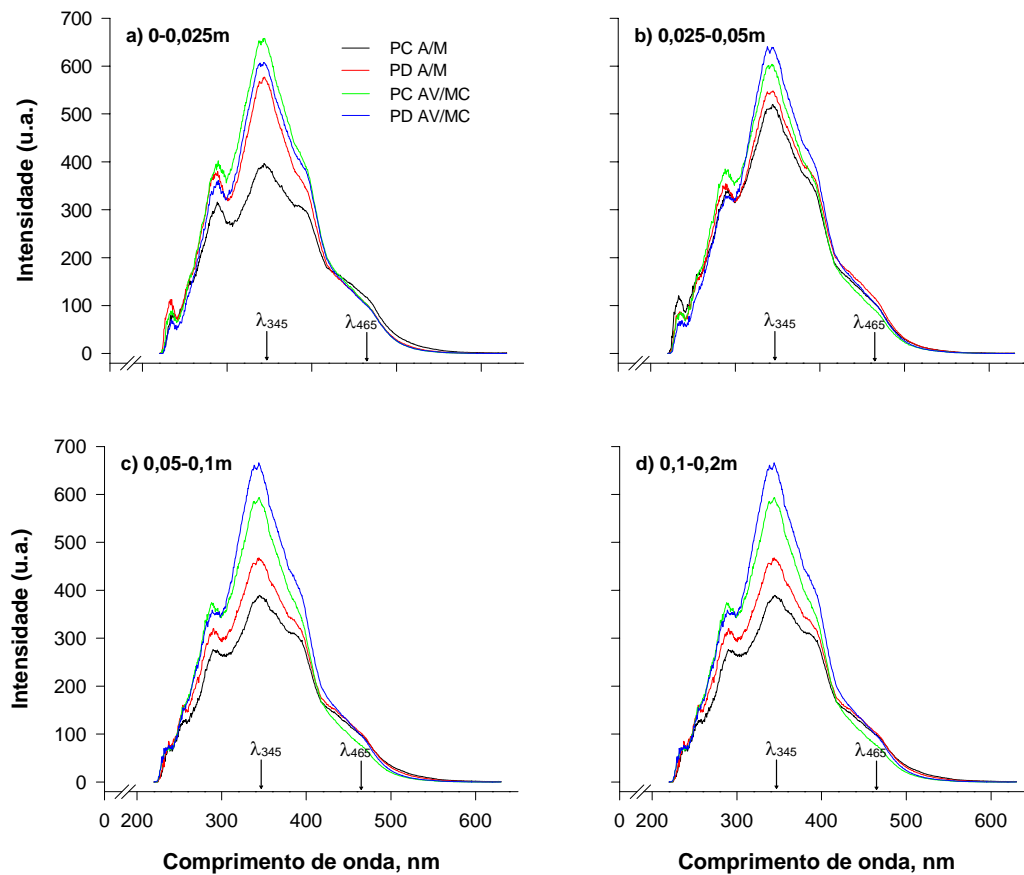


FIGURA 12. Espectros de síncronos em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi).

A recalitrância da MOD obtido por espectros de síncronos, emissão em 465 nm e absorvância em 285 nm evidenciaram que a MOD em sistema PC apresentou maior recalitrância em comparação a MOD em PD quando combinado ao sistema de cultura A/M (Tabela 7). Porém, na combinação com o sistema de cultura AV/MC, ambos os sistemas de preparo do solo foram similares quanto ao grau de recalitrância da MOD. Ou seja, em sistemas de culturas onde a adição de resíduos foi elevada ($> 8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), o efeito do preparo do solo sob a recalitrância da MOD foi minimizado. Neste caso, parece que o fator determinante da recalitrância da MOD está mais

relacionado a quantidade e qualidade do resíduo adicionado ao solo, do que propriamente com o preparo do solo. Mahieu et al. (2002) e González-Pérez et al. (2004) reportaram resultados similares sobre a recalcitrância de ácidos húmicos, onde os resíduos frescos adicionados ao solo, ricos em compostos lábeis, promoveram um efeito de diluição da matéria orgânica do solo, inicialmente mais recalcitrante, propiciando diferenças menos evidentes para o efeito do preparo do solo.

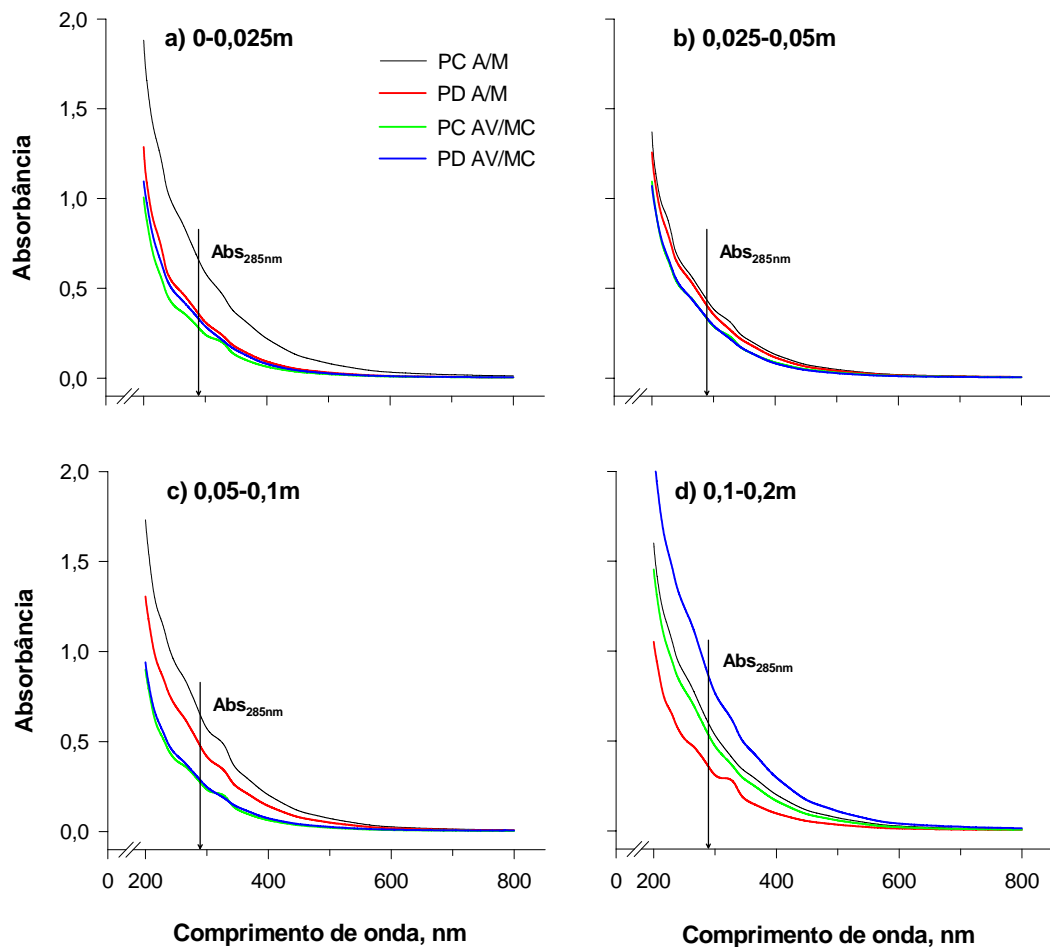


FIGURA 13. Espectros de absorbância de luz ultravioleta-vísivel (UV-VIS) em amostras de matéria orgânica dissolvida (MOD) em diferentes camadas de um Argissolo submetido a sistemas de preparo do solo (PC; preparo convencional e PD: plantio direto) e sistemas de cultura (A/M: aveia/milho e AV/MC: aveia+vica/milho+caupi).

O preparo do solo com lavração e gradagem ao longo de 18 anos intensificou a transformação da MOD em sistemas de manejo onde o aporte de

resíduos vegetais foi baixo, promovendo um enriquecimento gradativo da MOD com compostos recalcitrantes. Kalbitz (2001) também encontrou para solos intensivamente degradados, índices de recalcitrância da MOD superiores aos verificados em solos sem cultivo. Outros resultados na literatura também constataram que o menor revolvimento do solo e o alto aporte de resíduos vegetais reduz a recalcitrância da MOS utilizando outras técnicas espectroscópicas como ressonância paramagnética eletrônica (Bayer et al., 2002b) ressonância magnética nuclear (González-Pérez et al., 2004) e fluorescência induzida por laser (Milori et al., 2006).

A relação E_4/E_6 , uma das mais utilizadas na caracterização da MOS, não apresentou relação com os demais índices de recalcitrância obtido com MOD (Tabela 8). Apesar de utilizada com êxito em estudo com substâncias húmicas por Martin-Neto et al. (1991) e Ceretta (1995), a relação E_4/E_6 não se correlacionou com as demais metodologias. Outros estudos conduzidos por Kukkonen (1992) e Chin et al. (1994) também verificaram uma fraca relação da E_4/E_6 com o grau de aromaticidade. Por outro lado, os valores de índices de recalcitrância por Abs_{285nm} , I_{465nm}/I_{345nm} , A_{465nm} seguiram a mesma tendência (Tabela 8) e todos os três métodos apresentaram valores de recalcitrância consistentes com os valores obtidos em amostras de solo inteiro por FIL (Figura 9b,c,d). Isto evidencia a adequação da utilização da espectroscopia na avaliação de alterações qualitativas da MOD. Adicionalmente, a espectroscopia da MOD é uma técnica simples e relativamente barata se comparada a EPR e RMN de amostras de solo inteiro, e que evita procedimentos de concentração de matéria orgânica, o qual utiliza reagentes potencialmente tóxicos, como o ácido fluorídrico.

TABELA 8. Relação entre as metodologias utilizadas para determinação do índice de recalcitrância da MOD

Variável relacionada	IR I_{465nm}/I_{345nm}	IR Área $_{465 nm}$	IR $Abs_{.285 nm}$	IR E_4/E_1
IR A_4/A_1	-0,75	-0,82	-0,82	ns ¹
IR I_{465nm}/I_{345nm}	-	0,95	0,96	ns
IR Área $_{465 nm}$	-	-	0,98	ns
IR $Abs_{.285 nm}$	-	-	-	ns

¹ não significativo.

5.3.4. Conclusões

- 1 - O solo em plantio direto apresentou maior concentração de COEA em comparação ao solo em preparo convencional. Em ambos os sistemas de preparo do solo, a concentração de COEA aumentou pelo cultivo de leguminosas no sistema de cultura, relacionando-se com o estoque total de C orgânico do solo.
- 2 - A partir de análises espectroscópicas de fluorescência em COEA e absorção de luz na região do ultravioleta-visível foi possível inferir sobre a recalcitrância da MOD. Particularmente, a recalcitrância obtida por fluorescência de emissão em 465 nm, síncronos e absorção em 285 nm apresentaram estreita correlação com a recalcitrância obtida por fluorescência induzida por laser no solo inteiro. No entanto, a fluorescência de emissão em 240 nm e a relação E_4/E_6 não foram adequadas para avaliar a recalcitrância da MOD.
- 3 - No sistema de cultura A/M, a recalcitrância da MOD no sistema plantio direto foi menor em comparação ao solo em PC. Porém, a combinação do sistema de cultura AV/MC com os sistemas de preparo do solo determinaram índices de recalcitrância da MOD similares entre o plantio direto e preparo convencional.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados deste trabalho pode-se salientar alguns aspectos que poderão ser alvo de pesquisas futuras e contribuir para o avanço e entendimento das relações entre a dinâmica MOS e as práticas de manejo de solo.

1 – Avaliar a contribuição do sistema radicular de plantas cultivadas para o acúmulo de C no solo em relação a parte aérea, em ambiente tropical e subtropical;

2 - Avaliar o potencial de sistemas de manejo de solo em acumular C em camadas subsuperficiais do solo e a relação com o cultivo de leguminosas de inverno e verão em diferentes ambientes;

3 – Investigar a origem e a forma de alocação do C orgânico em camadas subsuperficiais do solo (sistema radicular, o transporte vertical de resíduos pela fauna do solo e a lixiviação de compostos orgânicos);

4 – Avaliar o efeito de custos energéticos relacionados às práticas de manejo de solo e a real contribuição destas para o sequestro de C no solo;

5 – Avaliar a emissão de outros gases do efeito estufa além do CO₂, relacionados aos sistemas de manejo de solo em diferentes ambientes;

6 – Ampliar a investigação sobre os efeitos de sistemas de manejo de solo sobre o C orgânico extraível em água em ambientes tropicais e subtropicais, inclusive utilizando sistemas de referência;

7 – Avaliar o efeito das oscilações climáticas anuais sobre o C orgânico extraível em água;

8 - Realizar estudos a fim de investigar a importância da MOS, resíduos de plantas, biomassa microbiana e exsudatos radiculares como fontes de C orgânico extraível em água no solo;

9 - Avaliar o uso de espectroscopia de fluorescência e na região do ultravioleta visível no estudo de matéria orgânica dissolvida extraída de resíduos vegetais;

10 – Avançar na aplicação das técnicas de fluorescência e UV-Vis e avaliar o uso de outras técnicas espectroscópicas em amostras de matéria orgânica dissolvida, como forma de inferir sobre a qualidade desta fração;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T.M. Entropy And sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, n.2, p.161-168, 1995.

ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Resolução padrão do diesel para ensaios de consumo de combustível e emissões veiculares**. 2003. http://www.anp.gov.br/doc/audiência_publica/Resolução_Diesel_Padrão_090304.pdf. Acesso em 06 jun. 2005.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDEZ, S.B.V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para milho em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.179-189, 2000.

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

ANDREUX, F. Húmus in world soils. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic Substances in Terrestrial Ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.45-100.

ANGERS, D.A.; VORONEY, R.P.; COTE, D. Dynamics of soil organic matter and corn residues affected by tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, n.5, p.1311-1315, 1995.

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, n.7-8, p.697-710, 2000.

BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. Natural ¹³C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v.19, n.1, p.25-30, 1987.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 28, n.9, p.1261-1263, 1996.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em

Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

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

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

BAYER, C. et al. 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, n.1-2, p.101-109, 2000b.

BAYER, C. et al. Effect of no-till cropping systems on SOM 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, n.2, p.95-104, 2000c.

BAYER, C. et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.65, n.5, p.1473-1478, 2001.

BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, Netherlands, v.238, n.1, p.133-140, 2002a.

BAYER, C. et al. Tillage and cropping systems effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v. 105, n.1-2, p. 81-92, 2002b.

BAYER, C.; DIECKOW, J. Sequestro de C em solos sob plantio direto no Brasil: **Taxas e aspectos metodológicos**. Foz do Iguaçu, PR: 2005. Notas.

BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 2006a. (no prelo)

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 2006b. (no prelo)

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da estação experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78p.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a Carbon Management Index, for agricultural systems. **Australian Journal Agricultural Research**, Collingwood, v. 46, n.7, p.1459-1466, 1995.

BLEVINS, R.L. et al. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.2, p. 135-146, 1983.

BODDEY, R.M. et al. Leguminosas para adubação verde promovem acúmulo de carbono no solo em plantio direto. In: SIMPOSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE, Foz do Iguaçu, 2005. **Anais: Meio Ambiente e Qualidade da água**. Foz do Iguaçu, 2005. p.216-218.

BOLINDER, M.A. et al. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.) **Plant and Soil**, Dordrecht, v.215, n.1, p. 85-91, 1999.

BREMER, E.; ELLERT, B.H.; JANZEN, H.H. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, n.5, p.1398-1403, 1995.

BRUCE, J.P. et al. Carbon sequestration in soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.54, n.1, p. 382-389, 1999.

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

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

CAMPBELL, C.A. et al. Influence of fertiliser and straw baling on soil organic matter in a thin Black Chernozem in western Canada. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v.23, n.5, p.443-446, 1991.

CANNAVO, P. et al. Potential for fluorescence spectroscopy to assess the quality of soil water-extracted organic matter. **Soil Science**, Ottawa, v. 169, n.10, p.688-696, 2004.

CATTELAN, A.; VIDOR, C. Sistemas de culturas e a população microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.2, p. 125-132, 1990.

CERETTA, C. A. **Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistemas de cultura sob plantio direto**. 1995. 127f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CERETTA, C.A. et al. Métodos espectroscópicos. In: SANTOS, G.A., CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.293-336.

CHANTIGNY, M.H. et al. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.61, n.1, p. 262-267, 1997.

CHANTIGNY, M.H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. **Geoderma**, Amsterdam, v.113, n.3-4, p. 357-380, 2003.

CHEN, Y.; SENESI, N.; SCHNIZER, M. Information provided on humic substances by E_4/E_6 ratios. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.41, n.2, p. 352-358, 1977.

CHENG, W. et al. Is available carbon limiting microbial respiration in the rhizosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.28, n.10-11, p.1283-1288, 1996.

CHIN, Y.; ALKEN, G.; LOUGHLIN, E.O. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances. **Environmental Science Technology**, Washington, v.28, n.11, p.1853-1858, 1994.

CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in soil Sciences**, New York, v.20, 1992. p.1-90.

CONDE, E. et al. The impacts of organic nitrogen applications on mineralization of ^{14}C -labelled maize and glucose, and on priming effect in saline alkaline soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.37, n.4, p.681-691, 2005.

COLLINS, R.L. et al. Soil carbon dynamics in corn-based agroecosystems: results from carbon-13 natural abundance. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.63, n., p. 584-591, 1999.

CONCEIÇÃO, P.C. et al. Agregação e C orgânico de um Argissolo sob diferentes sistemas de cultivo. In: FERTBIO, Lages, 2004. **Anais...** Lages: UDESC/CAV, 2004. 1CD-ROM.

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

DE BONA, F.D. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional**. 2005. 150f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DELPRAT, L. et al. Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.7, n.1-3, p. 201-210, 1997.

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

DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.268, n.1-2, p.319-328, 2005b.

DIECKOW, J. et al. Composition of organic matter in a subtropical Acrisol as influenced by land use, cropping and N fertilization, assessed by CPMAS ¹³C NMR spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.56, n.6, p.705-715, 2005.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.F. STEWART, B.A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society Of America, 1994. p.1-20. (Special Publication, 35)

DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Palestras...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, n.1, p. 3-11, 2000.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Agropecuária Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.

FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.69-117, 1997.

FLESSA, H. et al. The origin of soil organic carbon, dissolved organic C and respiration in a long-term maize experiment in Halle, Germany, determined by ¹³C natural abundance. **Journal Plant Nutrition Soil Science**, Berlin, v.163, n.2, p.157-163, 2000.

FOLLETT, R.F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, n.1-2, p. 77-92, 2001.

FREITAS, V.H. et al. Efeito de métodos de preparo do solo e sistemas de cultura na absorção de nitrogênio e rendimento de milho. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.2, n.1, p.69-77, 1996.

GLATZEL, S. et al. T. Dissolved organic matter properties and their relationship to carbon dioxide efflux from restored peat bogs. **Geoderma**, Amsterdam, v.113, n.3-4, p. 397-411, 2003.

GONZÁLEZ-PÉREZ, M. et al. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage by EPR, ^{13}C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.118, n.3-4, p.181-190, 2004.

GREGORICH, E.G.; ELLERT, B.H.; MONREAL, C.M. Turnover of soil organic matter and storage of corn residue carbon estimated from natural ^{13}C abundance. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, n.4, p.161-167, 1995.

GREGORICH, E.G. et al. Eludation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v.32, n.5, p. 581-587, 2000.

GREGORICH, E.G. et al. Biodegradability of soluble organic matter in maize-cropped soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.113, n.3-4, p. 237-252, 2003.

GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; SHULTEN, H.-R. Formation and mobilization pathways of dissolved organic matter: evidence from chemical structural studies of organic matter in acid forest floor solutions. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.21, n.1, p. 51-66, 1994.

HAYNES, R.J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.32, n.2, p.211-219, 2000.

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

IPCC. Climate change: The scientific basis. **Intergovernmental panel on climate change**. Cambridge (UK): Cambridge Univ. Press, 2001.

JANZEN, H.H. et a. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.56, n.6, p.1799-1806, 1992.

KALBITZ, K.; GEYER, W.; GEYER, S. Spectroscopic properties of dissolved humic substances – a reflection of land use history in a fen area. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.47, n.2, p. 219-238, 1999.

KALBITZ, K. et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. **Soil Science**, Baltimore, v.165, n.4, p. 277-304, 2000.

KALBITZ, K. Properties of organic matter in soil solution in a German fen area as dependent on land use and depth. **Geoderma**, Amsterdam, v.104, n.3-4, p. 203-214, 2001.

KONANOVA, M.M. **Soil organic matter**. Oxford: Pergamon Press, 1966. 272p.

KRULL, E.S.; BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for Modelling carbon turnover. **Functional Plant Biology**, Coolingwood, v.30, n.2, p.207-222, 2003.

KUKKONEN, J. Effects of ligni and chloralignin in pulsp mill effluents on the binding and bioavainability of hidrofobic organic pollutants. **Water Research**, Oxford, v.26, n.11, p.1523-1532, 1992.

KUMADA, K. **Chemistry of soil organic matter**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 241p.

LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.1-2, p.81-107, 1997.

LAL, R. et al. Managing US cropland to sequester carbon in soil. **Journal Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.54, n.1, p.374-381, 1999.

LAL, R. Carbon emission from farm operations. **Environmental International**, New York, v.30, n.7, p. 981-990, 2004a.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, n.1-2, p.1-22, 2004b.

LARSON, W.E., PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDIECK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: ASA:SSSA, 1994. p.37-51 (Special Publication, 35).

LEFROY, R.D.B.; BLAIR, G.J.; STRONG, W.M. changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³C natural isotope abundance. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.155/156, p.399-402, 1993.

LEINWEBER, P.; SCHULTEN, H.-R.; KÓRSCHENS, M. Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. **Biology and Fertility Soils**, New York, v.20, n.1, p. 17-23, 1995.

LEINWEBER, P. et al. Fulvic acids composition in degraded fenlands. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, Weinheim, v.164, n.4, p.371-379, 2001.

LEITE, L.F.C. et al. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação

mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.821-832, 2003.

LINN, D.M.; DORAN, J.W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.48, n.6, p.1267-1272, 1984.

LOVATO, T. **Dinâmica do Carbono e nitrogênio do solo afetados por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001. 133f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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

MAHIEU, N.; OLK, D.C.; RANDALL, E.W. Multinuclear magnetic resonance analysis of two humic acid fractions from lowland rice soils. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.31, n.2, p. 421-430, 2002.

MANN, L.K. Changes in soil carbon storage after cultivation. **Soil Science**, Baltimore, v.142, n.5, p.279-288, 1986.

MARTIN-NETO, L. et al. EPR of micronutrients-humic substances complexes extracted from a brazilian soil. **Soil Science**, Baltimore, v.151, n.58, p.369-376, 1991.

MAYER, L.M.; SCHINK, L.L.; LODER, T.C. Dissolved protein fluorescence in two Maine estuaries. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v.64, p.171-179, 1999.

MAZZARINO, M.J.; SZOTT, L.; JIMENEZ, M. Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water-soluble C in tropical agroecosystems. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.25, n.2, p. 205-214, 1993.

McCREA, R.C. Heavy metal and organochlorine contaminants in five major Ontario rivers of the Hudson bay lowland. **Water Pollution Research Journal of Canada**, Burlington, v.21, p.225-234, 1986.

McDOWELL, W.H. et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils. **Water Air Soil Pollution**, Dordrecht, v.105, n.1-2, p.175-182, 1998.

MCDOWELL, W.H.; LIKENS, G.E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. **Ecology Monography**, Washington, v.58, n.3, p.177-195, 1988.

MCKNIGHT, D.M. et al. Chemical characteristics of particulate, colloidal, and dissolved organic material in Loch Vale Watershed, Rocky Mountain National Park. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.36, n.1, p. 99-124, 1997.

MIANO, T.M.; SENESI, N. Synchronous excitation fluorescence spectroscopy applied to soil humic substances chemistry. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.117/118, p.41-51, 1992.

MILORI, D.M.B.P. et al. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Ottawa, v.167, n.11, p.739-749, 2002.

MILORI, D.M.B.P. et al. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.70, n.1, p.57-63, 2006.

MONREAL, C.M.; JANZEN, H.H. Soil organic carbon dynamics after 80 years of cropping a dark brown Chernozem. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.73, n.1, p.133-136, 1993.

MOORE, T.R.; DALVA, M. Some controls on the release of dissolved organic carbon by plants tissues and soils. **Soil Science**, Baltimore, v.166, n.1, p.39-47, 2001.

MOPPER, K. ; SCHULTZ, C.A. Fluorescence as a possible tool for studying the nature and water column distribution of DOC componets. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v.41, n.1-3, p.229-238, 1993.

OADES, J.M. et al. Influence of management on the composition of organic matter in a red-brown earth as shown by ¹³C nuclear magnetic resonance. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.26, n.2, p.289-299, 1988.

OHNO, T. Fluorescence Inner-Filtering correction for determining the Humification Index of Dissolved Organic Matter. **Environmental Science Technology**, Washington, v.36,n.4, p.742-746, 2002.

PARK, J.-H.; KALBITZ, K.; MATZNER, E. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.34, n.6, p. 813-822, 2002.

PAUL, J.W.; BEAUCHAMP, E.G. Effect of carbon constituents in manure on denitrification in soil. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.69, n.1, p.49-61, 1989.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, n.2, p.476-488, 1992.

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

PORTELLA, J.A.; RICHERDSON, L.I. Determinação do Consumo de Combustível e Rendimento de Máquinas e Implementos Agrícolas na Comparação dos Sistemas de Semeadura. In: REUNIÃO ANUAL CONJUNTA DE PESQUISA DE TRIGO, Passo Fundo, 1980. **Proceedings**, Passo Fundo: Embrapa CNPT, 1980. p. 33-40.

RAULUND-RASMUSSEN, K. et al. Effect of natural soil solutes on weathering rates of soil minerals. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.49, p.397-406.

REEVES, D.W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.1-2, p. 131-167, 1997.

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

SA, J.C.D. et al. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, n.5, p.1486-1499, 2001.

SALTON, J.C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SAVIOZZI, A.; LEVI-MINZI, R.; RIFFALDI, R., The effect of forty years of continuous corn on soil organic matter characteristics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.160, n.1, p.139-145, 1994.

SCHLESINGER, W.H. Carbon and Agriculture - Carbon sequestration in soils. **Science**, Washington, v.284, n.5423, p.2095, 1999.

SCHLESINGER, W.H. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**, Amsterdam, v.82, n.1-3, p.21-127, 2000.

SENESI, N. et al. Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Ottawa, v.152, n.4, p.259-271, 1991.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science**, Ottawa, v.162, n.11, p.795-807, 1997.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. Revista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.3, p.541-547, 1994.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.2, p.313-319, 1997.

SILVA, M.A.S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.544-552, 2005.

SISTI, C.P.J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, n.1, p.39-58, 2004.

SIX, J.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.63, n.5, p.1350-1358, 1999.

SKJEMSTAD, J.O.; DALAL, R.C.; BARRON, P.F. Spectroscopy investigation of cultivation effects on organic matter of Vertisols. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.50, n.2, p.354-359, 1986.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdam, v.74, n.1-2, p.65-105, 1996.

SOLLINS, P.; JANDL, R. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle. **Biology and Fertility Soils**, New York, v.25, n.2, p.196-201, 1997.

TESTA, V.M. **Características químicas de um solo Podzólico Vermelho Escuro, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas**. 1989. 146f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

THENG, B.K.G.; TATE, K.R.; SOLLINS, P. Constituents of organic matter in temperate na tropical soil. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. (Eds) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: Iniversity of Hawaii, 1989. p.5-32.

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

VIEIRA, F.C.B.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Índices de Labilidade da Matéria Orgânica e de Manejo de Carbono em Solo sob Plantio Direto em Diferentes Sistemas de Cultura In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2004. 1CD ROM.

VOGT, K.A. et al. Organic matter and nutrients dynamics in Forest floors of young and mature *Abies-amabilis* stands in western Washington, as affected by fine root input. **Ecological monographs**, Washington, v.53, n.2, p.139-157, 1983.

WEIL, R.R. et al. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, Madison, v.18, n.1, p. 3-17, 2003.

WEST, T.; MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**, Amsterdam, v.91, n.1-3, p. 217-232, 2002.

WHITBREAD, A.M.; BLAIR, G.J.; LEFROY R.D.B. Managing legume leys, residues and fertilisers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia. 2. Soil physical fertility and carbon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.54, n. 1-2, p.77-89, 2000.

WILLIAMS, B.L.; EDWARDS, A.C. Processes influencing dissolved organic nitrogen, phosphorus, and sulphur in soils. **Chemical Ecology**, Dordrecht, v.8, p.203-215, 1993.

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.

ZANATTA, J.A. et al. Soil C accumulation and C equivalent costs related to tillage, cropping systems and N fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam. (submitted)

ZECH, W. et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.1-4, p.117-161, 1997.

ZSOLNAY, A. Dissolved humus in soil waters. In: PICCOLO, A. (Ed.), **Humic Substances in Terrestrial Ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.171-223.

ZSOLNAY, A. et al. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soil subjected to drying. **Chemosphere**, Oxford, v.38, n.1, p.45-50, 1999.

8. APÊNDICES

Apêndice 1. Matéria seca e C adicionado pela parte aérea das plantas de cobertura (aveia, vica, caupi) em um Argissolo sob três sistemas de preparo do solo (PC: preparo convencional, PR: preparo reduzido, PD: plantio direto) e dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹), nos anos agrícolas de 1999 a 2004, na média de 1985 a 1998 e na média dos 20 anos de condução do experimento

Preparo		PC – Preparo Convencional						PR – Preparo Reduzido						PD – Plantio Direto					
Culturas		A/M		V/M		AV/MC		A/M		V/M		AV/MC		A/M		V/M		AV/MC	
N , kg ha ⁻¹		0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180
Safra	ano	-----Mg ha ⁻¹ -----																	
1999	15 ^o	1,96	2,22	3,43	3,02	4,98	4,53	2,00	2,17	3,01	2,77	4,45	4,41	2,73	2,69	3,72	3,37	5,83	5,15
2000	16 ^o	1,96	2,22	3,43	3,02	4,98	4,53	2,00	2,17	3,01	2,77	4,45	4,41	2,73	2,69	3,72	3,37	5,83	5,15
2001	17 ^o	1,96	2,22	3,43	3,02	4,98	4,53	2,00	2,17	3,01	2,77	4,45	4,41	2,73	2,69	3,72	3,37	5,83	5,15
2002	18 ^o	2,01	2,01	2,55	2,55	3,48	3,48	2,16	2,16	2,71	2,71	3,90	3,90	2,27	2,27	3,15	3,15	4,97	4,97
2003 ¹	19 ^o	2,72	2,89	4,48	3,34	6,48	5,55	2,16	2,16	2,71	2,71	3,90	3,90	3,95	4,01	4,50	3,96	8,04	6,06
2004	20 ^o	1,99	1,99	3,42	3,42	5,27	5,27	1,83	1,83	3,04	3,04	4,94	4,94	2,44	2,44	3,86	3,86	5,20	5,20
Média 99-03		2,10	2,26	3,46	3,06	5,03	4,65	2,03	2,11	2,92	2,80	4,35	4,33	2,81	2,80	3,78	3,51	5,95	5,28
Média 85-98 ²		2,91	3,49	4,89	5,10	5,69	5,38	2,98	3,82	4,60	4,86	5,71	5,53	3,09	3,77	4,46	4,39	5,59	4,98
Média 20 anos		2,67	3,12	4,46	4,49	5,49	5,16	2,69	3,31	4,09	4,24	5,30	5,17	3,01	3,48	4,26	4,13	5,70	5,07
C vica+aveia		1,07	1,25	1,78	1,80	2,20	2,06	1,08	1,32	1,64	1,70	2,12	2,07	1,20	1,39	1,70	1,65	2,28	2,03
C caupi ²						1,54	1,45					1,54	1,49					1,51	1,35
C coberturas		1,07	1,25	1,78	1,80	3,74	3,51	1,08	1,32	1,64	1,70	3,66	3,56	1,20	1,39	1,70	1,65	3,79	3,38

¹Ano agrícola com presença abundante de nabo forrageiro nas parcelas com vica.

²Dados obtidos em Lovato (2001).

Apêndice 2. Carbono adicionado pela parte aérea acrescido de 30% de contribuição do sistema radicular das culturas de inverno (aveia+vica) e de verão (milho+caupi) em um Argissolo, cultivado em sistemas de preparo do solo e sistemas de culturas, manejados em dois níveis de adubação nitrogenada (0 e 180 kg N ha⁻¹), por 18 anos

Preparo solo ¹	Sistema Cultura ²	Dose N	----1 ^o - 13 ^o ano ³ ----		----14 ^o - 18 ^o ano----		---- 1 ^o - 18 ^o ano----	
			inverno	verão	inverno	verão	inverno	verão
		kg ha ⁻¹ 1	----- Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----					
PC	A/M	0	1,58	2,65	1,12	2,74	1,40	2,67
PC	V/M	0	2,61	3,85	1,84	3,33	2,35	3,44
PC	AV/MC	0	2,32	5,2	2,51	4,64	2,83	4,74
PD	A/M	0	1,88	4,79	1,41	2,54	1,55	2,47
PD	V/M	0	2,74	5,08	1,95	3,54	2,22	3,36
PD	AV/MC	0	1,84	6,55	2,92	4,72	2,91	4,69
PC	A/M	180	1,64	2,28	1,26	5,18	1,66	4,63
PC	V/M	180	2,36	3,44	1,74	5,38	2,40	4,70
PD	AV/MC	180	2,21	4,69	2,33	6,62	2,67	6,06
PD	A/M	180	2,03	4,60	1,47	5,22	1,82	4,57
PD	V/M	180	2,36	4,75	1,83	5,19	2,16	4,62
PD	AV/MC	180	1,11	6,09	2,64	5,34	2,60	6,08

¹ PC: preparo convencional, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica /milho+caupi.

³ Dados obtido em Lovato (2001).

Apêndice 03. Valores médios anuais estimados de N adicionado ao solo, reciclado e retirado pelos sistemas de preparo do solo (PC: preparo do solo, PR: preparo reduzido, PD: plantio direto) e sistemas de culturas (A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi) na média de 18 anos de condução do experimento

Preparo solo	Sistema cultura	Culturas cobertura				Milho		Sistema		
		N adubo ¹	N acumulado ²	N aveia ³	N fixado ⁴	N palha ⁵	N grãos ⁶	N total reciclado ⁷	N total adicionado ⁸	N adicionado anualmente ⁹
----- kg ha ⁻¹ -----										
PC	A/M	0	35	35	0	24	22	59	-22	37
	V/M	0	121	35	86	46	43	81	43	124
	AV/MC	0	171	35	136	39	36	74	100	174
PR	A/M	0	32	32	0	23	21	55	-21	34
	V/M	0	114	32	82	42	39	74	43	117
	AV/MC	0	160	32	128	40	37	72	91	163
PD	A/M	0	35	35	0	19	16	54	-16	37
	V/M	0	108	35	73	43	41	78	32	111
	AV/MC	0	153	35	118	38	36	73	82	155
PC	A/M	150	38	38	0	78	76	116	74	191
	V/M	150	115	38	77	80	78	118	149	268
	AV/MC	150	139	38	101	78	75	116	176	292
PR	A/M	150	40	40	0	81	78	121	72	193
	V/M	150	117	40	77	77	75	117	152	270
	AV/MC	150	132	40	92	80	77	120	165	285
PD	A/M	150	39	39	0	77	74	116	76	192
	V/M	150	102	39	63	78	75	117	138	255
	AV/MC	150	131	39	92	81	78	120	164	284

¹ N adubo = média ponderada de 18 anos.

² N acumulado = N tecido plantas cobertura x MS plantas cobertura.

³ N aveia= N tecido aveia x MS da aveia.

⁴ N fixado = N acumulado – N aveia.

⁵ N palha = N tecido milho x MS milho.

⁶ N grãos = teor de N grãos x MS de grãos milho.

⁷ N total reciclado = N aveia + N palha.

⁸ N total adicionado = (N adubo + N fixado) – N grãos.

⁹ N adicionado = (N adubo + N acumulado + N palha) – N grãos.

Apêndice 4. Produtividade de grãos de milho (12,5% umidade), nos blocos I, II e III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Safr	Dose N (kg ha ⁻¹)	Sistema Cultura ¹	Preparo Convencional				Preparo Reduzido				Plantio Direto			
			Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média
----- Mg ha ⁻¹ -----														
2000/01	0	A/M	2,01	1,61	1,25	1,62	2,59	1,76	1,35	1,90	1,29	1,95	1,83	1,69
		V/M	2,43	3,52	2,83	2,93	4,94	3,76	3,17	3,96	4,75	2,81	5,71	4,43
		AV/MC	3,62	2,21	1,69	2,51	4,45	2,06	3,50	3,34	3,58	3,52	3,40	3,50
		Média	2,69	2,45	1,92	2,35	3,99	2,53	2,67	3,07	3,21	2,76	3,65	3,21
	180	A/M	11,35	9,38	10,86	10,53	12,42	11,25	12,51	12,06	9,94	9,68	11,81	10,48
		V/M	10,93	11,34	10,15	10,81	10,56	13,02	10,03	11,20	12,73	9,59	10,01	10,78
		AV/MC	13,10	10,03	8,41	10,51	11,51	15,55	10,73	12,60	13,11	11,37	9,79	11,42
		Média	11,79	10,25	9,81	10,62	11,50	13,27	11,09	11,95	11,93	10,21	10,54	10,89
2001/02	0	A/M	2,61	1,37	5,74	3,24	5,00	3,18	4,27	4,15	5,41	3,76	3,05	4,07
		V/M	5,88	5,06	5,69	5,54	3,77	4,35	5,23	4,45	6,08	5,45	4,58	5,37
		AV/MC	4,40	4,44	7,56	5,47	5,08	3,94	2,82	3,95	5,05	5,14	4,13	4,77
		Média	4,30	3,62	6,33	4,75	4,62	3,82	4,11	4,18	5,51	4,78	3,92	4,74
	180	A/M	8,30	7,66	11,31	9,09	8,21	9,71	9,63	9,18	9,59	7,11	10,23	8,98
		V/M	10,60	9,96	9,56	10,04	8,94	9,85	8,60	9,13	9,44	7,35	8,28	8,36
		AV/MC	8,24	10,52	8,81	9,19	10,20	8,34	9,68	9,41	9,61	10,21	9,59	9,80
		Média	9,05	9,38	9,89	9,44	9,12	9,30	9,30	9,24	9,55	8,22	9,37	9,05
2002/03	0	A/M	3,67	4,47	4,58	4,24	0,91	5,56	1,92	2,80	1,11	4,98	1,00	2,36
		V/M	4,25	2,07	2,56	2,96	4,21	4,17	5,07	4,48	4,34	4,49	4,41	4,41
		AV/MC	1,53	1,33	5,99	2,95	1,46	1,67	5,40	2,84	4,65	2,26	1,81	2,91
		Média	3,15	2,62	4,38	3,38	2,19	3,80	4,13	3,37	3,37	3,91	2,41	3,23
	180	A/M	7,91	9,41	8,14	8,48	8,26	7,18	8,83	8,09	8,89	8,80	9,44	9,04
		V/M	9,01	8,37	8,50	8,63	6,46	9,50	7,53	7,83	8,70	6,91	8,08	7,90
		AV/MC	6,94	8,93	10,30	8,72	7,25	8,04	9,52	8,27	7,96	9,31	9,02	8,76
		Média	7,95	8,90	8,98	8,61	7,32	8,24	8,63	8,06	8,52	8,34	8,85	8,57

Apêndice 4. Continuação...

Safr	Dose N (kg ha ⁻¹)	Sistema Cultura ¹	Preparo Convencional				Preparo Reduzido				Plantio Direto			
			Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média
----- Mg ha ⁻¹ -----														
2003/04	0	A/M	2,57	1,94	4,22	2,91	1,96	0,38	2,47	1,60	2,40	2,10	1,39	1,97
		V/M	1,60	6,73	7,62	5,31	6,63	5,52	5,74	5,96	8,06	6,04	6,35	6,82
		AV/MC	3,52	5,27	4,95	4,58	6,85	5,64	4,53	5,67	6,45	9,32	4,73	6,83
		Média	2,56	4,65	5,60	4,27	5,15	3,85	4,25	4,41	5,64	5,82	4,16	5,21
	180	A/M	10,83	9,17	9,38	9,79	10,08	8,97	9,07	9,38	9,15	9,98	8,37	9,17
		V/M	11,92	13,12	10,37	11,80	11,92	10,08	10,89	10,97	11,34	7,80	10,59	9,91
		AV/MC	11,98	8,67	10,63	10,43	11,40	11,60	9,68	10,89	12,31	11,09	9,70	11,03
		Média	11,58	10,32	10,13	10,67	11,13	10,22	9,88	10,41	10,93	9,62	9,55	10,04
2004/05	0	A/M	2,19	1,02	0,68	1,30	2,51	1,33	3,36	2,40	2,12	0,94	1,21	1,43
		V/M	4,13	4,72	5,93	4,93	4,16	5,55	5,70	5,14	6,49	2,02	4,33	4,28
		AV/MC	2,93	1,82	3,65	2,80	3,33	6,05	3,06	4,15	3,92	5,18	4,28	4,46
		Média	3,08	2,52	3,42	3,01	3,34	4,31	4,04	3,90	4,18	2,72	3,27	3,39
	180	A/M	6,66	6,21	6,39	6,42	8,06	6,02	6,58	6,89	6,71	7,39	7,54	7,22
		V/M	8,72	6,11	7,54	7,46	6,76	5,93	8,17	6,95	5,22	0,80	5,45	3,82
		AV/MC	6,92	8,11	5,94	6,99	7,80	6,37	6,55	6,90	5,42	6,67	8,11	6,73
		Média	7,43	6,81	6,62	6,96	7,54	6,10	7,10	6,91	5,78	4,95	7,03	5,92

¹A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 5. Teores de carbono e nitrogênio, relação C:N e densidade do solo nas camadas do solo de cada tratamento avaliado

tratamento ¹	Camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo ²
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
		----- g kg ⁻¹ de solo -----												Mg m ⁻³
PC A/M 0N	0-0,025	9,72	10,02	9,10	9,61	0,66	0,64	0,72	0,67	14,7	15,7	12,6	14,3	1,44
	0,025-0,05	9,09	8,30	8,32	8,57	0,90	0,96	0,84	0,90	10,1	8,6	9,9	9,5	1,57
	0,05-0,1	9,01	8,55	8,89	8,82	0,88	0,88	0,76	0,84	10,2	9,7	11,7	10,5	1,57
	0,1-0,2	8,68	9,00	8,16	8,61	0,86	0,58	0,72	0,72	10,1	15,5	11,3	12,0	1,60
	0,2-0,3	9,11	8,57	8,19	8,62	0,82	0,78	0,74	0,78	11,1	11,0	11,1	11,1	1,60
	0,3-0,4	9,91	8,39	8,45	8,92	0,80	0,64	0,80	0,75	12,4	13,1	10,6	11,9	1,60
	0,4-0,5	10,16	8,05	8,53	8,91	0,84	0,67	0,80	0,77	12,1	12,0	10,7	11,6	1,60
	0,5-0,6	10,01	8,05	7,38	8,48	0,82	0,64	0,62	0,69	12,2	12,6	11,9	12,3	1,60
	0,6-0,8	7,84	6,83	6,95	7,21	0,68	0,58	0,60	0,62	11,5	11,8	11,6	11,6	1,60
0,8-1,0	6,47	5,58	5,44	5,83	0,60	0,60	0,60	0,60	10,8	9,3	9,1	9,7	1,60	
PC A/M 180N	0-0,025	9,38	10,53	10,75	10,22	0,90	1,06	0,96	0,97	10,4	9,9	11,2	10,5	1,44
	0,025-0,05	9,25	10,31	9,58	9,71	0,88	0,99	0,86	0,91	10,5	10,4	11,1	10,7	1,57
	0,05-0,1	8,95	9,69	8,94	9,19	0,88	0,96	0,98	0,94	10,2	10,1	9,1	9,8	1,57
	0,1-0,2	8,98	9,35	9,71	9,35	0,78	0,80	0,97	0,85	11,5	11,7	10,0	11,0	1,60
	0,2-0,3	9,59	9,43	9,33	9,45	0,78	0,76	0,78	0,77	12,3	12,4	12,0	12,3	1,60
PC V/M 0N	0-0,025	10,56	11,11	10,65	10,77	1,08	1,04	1,02	1,05	9,8	10,7	10,4	10,3	1,44
	0,025-0,05	9,43	9,44	11,04	9,97	0,90	0,98	1,04	0,98	10,5	9,6	10,6	10,2	1,57
	0,05-0,1	9,87	10,04	10,17	10,03	0,98	0,92	0,94	0,95	10,1	10,9	10,8	10,6	1,57
	0,1-0,2	9,39	9,96	10,01	9,79	0,96	0,98	0,98	0,97	9,8	10,2	10,2	10,1	1,60
	0,2-0,3	9,69	9,17	9,93	9,60	0,80	0,88	0,88	0,85	12,1	10,4	11,3	11,3	1,60

Apêndice 5. Continuação...

tratamento ¹	Camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo ²
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
		----- g kg ⁻¹ de solo -----												
PC V/M 180N	0-0,025	10,16	10,38	11,89	10,81	0,98	0,98	1,18	1,05	10,4	10,6	10,1	10,3	1,44
	0,025-0,05	10,46	9,24	11,22	10,31	0,98	0,98	1,18	1,05	10,7	9,4	9,5	9,8	1,57
	0,05-0,1	10,58	9,21	9,81	9,87	0,98	0,88	1,02	0,96	10,8	10,5	9,6	10,3	1,57
	0,1-0,2	9,95	9,41	10,74	10,03	0,98	1,00	1,02	1,00	10,2	9,4	10,5	10,0	1,60
	0,2-0,3	9,80	9,40	10,49	9,90	0,92	0,86	0,80	0,86	10,7	10,9	13,1	11,5	1,60
PC AV/MC 0N	0-0,025	12,83	13,11	9,76	11,90	0,98	1,30	1,05	1,11	13,1	10,1	9,3	10,7	1,44
	0,025-0,05	10,86	11,22	9,94	10,67	1,00	0,99	0,92	0,97	10,9	11,3	10,8	11,0	1,57
	0,05-0,1	11,47	10,54	9,61	10,54	1,03	0,98	1,02	1,01	11,1	10,8	9,4	10,4	1,57
	0,1-0,2	10,94	9,55	9,09	9,86	1,01	0,89	0,87	0,93	10,8	10,7	10,4	10,6	1,60
	0,2-0,3	9,90	9,59	8,99	9,49	0,79	0,80	0,77	0,79	12,5	12,0	11,7	12,0	1,60
PC AV/MC 180N	0-0,025	13,02	12,48	12,91	12,80	1,29	1,19	1,19	1,22	10,1	10,5	10,8	10,5	1,44
	0,025-0,05	11,63	11,53	10,82	11,33	1,09	1,08	1,05	1,07	10,7	10,7	10,3	10,6	1,57
	0,05-0,1	10,50	10,77	10,13	10,47	1,18	1,08	1,07	1,11	8,9	10,0	9,5	9,4	1,57
	0,1-0,2	9,85	10,78	9,88	10,17	1,02	0,99	0,95	0,99	9,7	10,9	10,4	10,3	1,60
	0,2-0,3	9,40	9,86	8,93	9,40	0,76	0,77	0,76	0,76	12,4	12,8	11,8	12,4	1,60
PD AM 0N	0-0,025	14,94	16,23	18,17	16,45	1,27	1,55	1,70	1,50	11,8	10,5	10,7	11,0	1,35
	0,025-0,05	10,17	12,14	12,42	11,58	1,02	1,21	1,19	1,14	10,0	10,0	10,4	10,2	1,51
	0,05-0,1	8,72	9,14	8,61	8,82	0,79	0,86	0,78	0,81	11,0	10,6	11,0	10,9	1,67
	0,1-0,2	8,50	8,30	8,50	8,43	0,73	0,69	0,73	0,72	11,6	12,0	11,6	11,7	1,65
	0,2-0,3	9,21	9,10	10,07	9,46	0,69	0,67	0,74	0,70	13,3	13,6	13,6	13,5	1,65

Apêndice 5. Continuação...

tratamento ¹	Camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo ²
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
		----- g kg ⁻¹ de solo -----												
PD A/M 180N	0-0,025	19,44	19,75	20,48	19,89	1,68	1,78	1,83	1,76	11,6	11,1	11,2	11,3	1,35
	0,025-0,05	15,85	13,30	13,69	14,28	1,63	1,71	1,39	1,58	9,7	7,8	9,8	9,0	1,51
	0,05-0,1	9,41	9,42	9,95	9,59	0,88	0,89	0,90	0,89	10,7	10,6	11,1	10,8	1,67
	0,1-0,2	7,88	8,46	8,10	8,15	0,70	0,74	0,69	0,71	11,3	11,4	11,7	11,5	1,65
	0,2-0,3	8,47	8,40	10,10	8,99	0,71	0,68	0,71	0,70	11,9	12,4	14,2	12,8	1,65
PD V/M 0N	0-0,025	21,86	21,55	20,23	21,21	2,02	1,96	2,00	2,00	10,8	11,0	10,1	10,6	1,35
	0,025-0,05	13,10	18,04	14,43	15,19	1,39	1,77	1,46	1,54	9,4	10,2	9,9	9,9	1,51
	0,05-0,1	9,69	11,73	10,25	10,56	0,94	1,19	1,03	1,05	10,3	9,9	10,0	10,1	1,67
	0,1-0,2	8,27	9,14	8,77	8,73	0,77	0,83	0,77	0,79	10,7	11,0	11,4	11,1	1,65
	0,2-0,3	8,45	9,25	8,85	8,85	0,69	0,73	0,69	0,70	12,2	12,7	12,8	12,6	1,65
PD V/M 180N	0-0,025	22,90	20,81	16,38	20,03	1,93	2,16	1,98	2,03	11,9	9,6	8,3	9,9	1,35
	0,025-0,05	17,02	14,08	11,29	14,13	1,71	1,81	1,49	1,67	10,0	7,8	7,6	8,5	1,51
	0,05-0,1	11,02	10,57	10,16	10,58	1,12	1,11	1,01	1,08	9,8	9,5	10,1	9,8	1,67
	0,1-0,2	8,41	8,37	8,63	8,47	0,79	0,77	0,73	0,77	10,6	10,9	11,8	11,0	1,65
	0,2-0,3	8,84	9,13	8,87	8,95	0,74	0,85	0,71	0,77	11,9	10,7	12,5	11,6	1,65
PD AV/MC 0N	0-0,025	21,30	22,41	22,79	22,17	2,16	1,94	2,18	2,09	9,9	11,6	10,5	10,6	1,35
	0,025-0,05	14,33	15,74	17,59	15,89	1,48	1,50	1,70	1,56	9,7	10,5	10,3	10,2	1,51
	0,05-0,1	9,58	10,65	11,79	10,67	1,04	1,03	1,20	1,09	9,2	10,3	9,8	9,8	1,67
	0,1-0,2	8,27	8,71	10,17	9,05	0,75	0,75	0,86	0,79	11,0	11,6	11,8	11,5	1,65
	0,2-0,3	8,79	9,04	10,36	9,40	0,74	0,73	0,74	0,74	11,9	12,4	14,0	12,7	1,65

Apêndice 5. Continuação...

tratamento ¹	Camada	Carbono				Nitrogênio				Relação C:N				densidade do solo ²
		Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	Rep. I	Rep. II	Rep. III	média	
		----- g kg ⁻¹				----- de solo -----								Mg m ⁻³
PD AV/M C 180N	0-0,025	19,70	28,50	24,70	24,30	2,19	2,67	2,40	2,42	9,0	10,7	10,3	10,0	1,35
	0,025-0,05	14,28	18,45	17,46	16,73	1,62	1,82	1,73	1,72	8,8	10,1	10,1	9,7	1,51
	0,05-0,1	10,25	12,30	12,51	11,69	1,22	1,25	1,27	1,24	8,4	9,8	9,9	9,4	1,67
	0,1-0,2	9,19	8,81	9,48	9,16	0,85	0,80	0,86	0,84	10,8	11,0	11,0	10,9	1,65
	0,2-0,3	8,76	9,89	9,99	9,55	0,79	0,82	0,76	0,79	11,1	12,1	13,1	12,1	1,65
	0,3-0,4	8,61	10,50	10,04	9,72	0,77	0,79	0,79	0,78	11,2	13,3	12,7	12,5	1,65
	0,4-0,5	7,95	10,12	10,03	9,37	0,68	0,78	0,74	0,73	11,7	13,0	13,6	12,8	1,65
	0,5-0,6	7,14	9,77	9,38	8,76	0,66	0,73	0,70	0,70	10,8	13,4	13,4	12,5	1,65
	0,6-0,8	6,18	8,55	8,95	7,89	0,58	0,68	0,69	0,65	10,7	12,6	13,0	12,1	1,65
	0,8-1,0	5,28	6,36	6,82	6,15	0,46	0,52	0,64	0,54	11,5	12,2	10,7	11,4	1,65

¹ PC: preparo do solo, PD: plantio direto, A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi, ON: 0kg N ha⁻¹ e 180N: 180 kg N ha⁻¹.

² Obtido de Silva et al. (2005).

Apêndice 6. Teores de carbono na fração leve (FL) da MOS em sistemas de manejo de solo em duas repetições de laboratório e na média

Sistema cultura ¹	Dose de N kg ha ⁻¹	Camada	Plantio direto - PD			Preparo convencional -PC		
			I	II	média	I	II	média
			----- g kg ⁻¹ solo -----					
A/M	0	0-0,025	0,909	1,607	1,258	0,400	0,608	0,504
		0,025-0,05	1,248	0,521	0,885	0,300	0,390	0,345
		0,05-0,1	0,373	0,330	0,351	0,260	0,344	0,302
		0,1-0,2	0,275	0,230	0,252	0,338	0,283	0,311
A/M	180	0-0,025	2,974	1,893	2,434	0,969	0,675	0,822
		0,025-0,05	0,902	0,691	0,797	0,587	0,383	0,485
		0,05-0,1	0,408	0,344	0,376	0,486	0,370	0,428
		0,1-0,2	0,310	0,263	0,287	0,433	0,363	0,398
AV/MC	0	0-0,025	3,740	2,875	3,307	1,097	0,947	1,022
		0,025-0,05	1,118	0,878	0,998	0,271	0,531	0,401
		0,05-0,1	0,447	0,410	0,429	0,298	0,349	0,323
		0,1-0,2	0,280	0,258	0,269	0,423	0,332	0,378
AV/MC	180	0-0,025	4,073	3,639	3,856	1,603	1,077	1,340
		0,025-0,05	1,383	1,250	1,317	0,816	0,593	0,704
		0,05-0,1	0,573	0,550	0,562	0,567	0,460	0,513
		0,1-0,2	0,354	0,300	0,327	0,506	0,420	0,463

¹A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 7. Teores de carbono total, C na fração leve e densidade do solo em área de campo nativo adjacente ao experimento

Profundidade	C total ¹	C fração leve ¹	densidade solo ²
m	----- g kg ⁻¹ solo -----		Mg m ⁻³
0-0,025	24,64	1,65	1,49
0,025-0,05	18,04	0,53	1,51
0,05-0,1	13,04	0,62	1,57
0,1-0,2	11,49	0,38	1,63
0,2-0,3	11,49	-	1,63

¹ Obtido de Lovato (2001).

² Amostras fracionadas obtidas em 1998 por Lovato (2001).

Apêndice 8. Teores de carbono orgânico extraível em água (COEA e pH da matéria orgânica dissolvida nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado por 18 anos em sistemas de preparo do solo e sistemas de cultura

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada	COEA				pH
			I	II	III	média	
			-----mg L ⁻¹ -----				
PC	A/M	0-0,025	18,4	16,1	15,4	16,6	6,75
		0,025-0,05	21,1	20,7	18,4	20,0	6,78
		0,05-0,1	21,7	24,0	18,8	21,4	6,96
		0,1-0,2	20,7	20,9	21,1	20,8	6,67
PC	V/M	0-0,025	22,4	24,1	25,8	24,0	-
		0,025-0,05	24,9	26,7	35,5	29,0	-
		0,05-0,1	21,0	26,9	20,9	22,9	-
		0,1-0,2	20,6	18,3	20,3	19,7	-
PC	AV/MC	0-0,025	26,0	28,6	23,1	25,9	6,92
		0,025-0,05	25,8	26,9	22,5	25,1	6,63
		0,05-0,1	25,5	22,4	17,4	21,8	6,67
		0,1-0,2	26,1	24,4	20,9	23,8	6,79
PD	A/M	0-0,025	29,8	31,5	20,5	27,3	6,84
		0,025-0,05	27,4	29,2	25,6	27,4	6,83
		0,05-0,1	19,8	22,2	22,9	21,6	6,89
		0,1-0,2	22,9	19,8	20,1	20,9	6,95
PD	V/M	0-0,025	38,0	46,1	29,3	37,8	-
		0,025-0,05	27,7	38,8	32,2	32,9	-
		0,05-0,1	18,2	30,3	24,0	24,2	-
		0,1-0,2	15,4	20,1	22,3	19,3	-
PD	AV/MC	0-0,025	45,1	35,5	44,0	41,5	6,97
		0,025-0,05	35,4	37,0	38,5	36,9	6,93
		0,05-0,1	24,7	25,9	28,9	26,5	6,84
		0,1-0,2	19,3	21,3	18,1	19,5	6,83

¹PC: preparo convencional e PD: plantio direto. ²A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 9. Área do espectro e índice de recalcitrância da matéria orgânica do solo por fluorescência induzida por laser em cada camada do solo e tratamento avaliado

Preparo do solo ¹	Sistema de Cultura ²	camadas (cm)	Área do espectro (u. a.)			Índice de Recalcitrância			
			I	II	III	I	II	III	Média
PC	A/M	0-0,025	339,07	352,26	347,69	349	352	382	361
		0,025-0,05	346,42	351,98	344,41	381	424	414	406
		0,05-0,1	388,30	415,04	376,12	431	485	423	446
		0,1-0,2	342,19	352,67	425,46	394	392	521	436
PC	AV/MC	0-0,025	321,63	323,34	324,97	251	247	333	277
		0,025-0,05	340,64	332,62	333,31	314	296	335	315
		0,05-0,1	344,27	344,88	336,55	300	327	350	326
		0,1-0,2	345,45	343,40	339,19	316	360	373	349
PD	A/M	0-0,025	316,27	302,03	314,38	212	186	173	190
		0,025-0,05	324,10	311,27	327,60	319	256	264	280
		0,05-0,1	341,76	334,96	360,86	392	366	419	393
		0,1-0,2	360,67	351,09	366,20	424	423	431	426
PD	AV/MC	0-0,025	328,47	308,01	329,03	154	137	144	145
		0,025-0,05	329,03	302,72	323,52	230	192	184	202
		0,05-0,1	362,12	322,39	338,71	378	303	287	323
		0,1-0,2	382,80	333,39	353,99	463	383	348	398

¹PC: preparo convencional, PD: plantio direto.

²A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 10. Teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) nos blocos I, II, III e na média de um Argissolo manejado sob sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral por 18 anos

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Dose N (kg ha ⁻¹)	Camada (m)	Ca				Mg				K			
				I	II	III	média	I	II	III	média	I	II	III	média
----- cmol _c kg ⁻¹ de solo -----															
PC	A/M	0	0-0,025	3,79	3,47	3,65	3,64	2,73	2,31	2,43	2,49	0,48	0,42	0,36	0,42
			0,025-0,05	3,92	3,32	3,74	3,66	2,53	1,97	2,17	2,22	0,39	0,32	0,30	0,33
			0,05-0,1	3,56	3,65	4,03	3,75	2,34	2,19	2,41	2,31	0,29	0,25	0,19	0,24
			0,1-0,2	4,01	3,65	4,06	3,91	2,46	2,16	2,77	2,46	0,21	0,20	0,17	0,20
PC	A/M	180	0-0,025	3,47	3,26	3,35	3,36	2,42	2,49	2,26	2,39	0,39	0,57	0,55	0,50
			0,025-0,05	3,68	3,08	3,08	3,28	2,38	1,98	1,69	2,02	0,35	0,42	0,34	0,37
			0,05-0,1	3,77	2,99	3,05	3,27	2,41	1,77	1,74	1,97	0,27	0,25	0,21	0,24
			0,1-0,2	3,74	3,74	3,65	3,71	2,38	2,24	1,95	2,19	0,27	0,13	0,14	0,18
PC	V/M	0	0-0,025	2,75	3,17	3,32	3,08	1,98	2,70	2,46	2,38	0,22	0,26	0,36	0,28
			0,025-0,05	2,93	3,08	3,23	3,08	1,97	2,13	2,20	2,10	0,13	0,15	0,25	0,18
			0,05-0,1	2,81	3,47	3,32	3,20	1,80	2,10	2,03	1,98	0,11	0,10	0,16	0,13
			0,1-0,2	3,05	3,50	3,29	3,28	1,93	2,11	1,86	1,97	0,11	0,09	0,12	0,11
PC	V/M	180	0-0,025	2,42	3,02	2,66	2,70	1,78	2,34	2,33	2,15	0,32	0,32	0,23	0,29
			0,025-0,05	2,57	2,90	2,42	2,63	1,61	1,85	1,65	1,70	0,17	0,18	0,18	0,18
			0,05-0,1	2,42	3,11	2,81	2,78	1,65	1,97	1,71	1,78	0,10	0,11	0,10	0,11
			0,1-0,2	2,81	3,11	2,81	2,91	1,69	1,95	1,88	1,84	0,08	0,07	0,07	0,07
PC	AV/MC	0	0-0,025	3,50	2,54	3,38	3,14	2,43	2,57	2,69	2,56	0,30	0,39	0,30	0,33
			0,025-0,05	2,96	2,63	3,11	2,90	1,92	1,91	2,05	1,96	0,26	0,32	0,17	0,25
			0,05-0,1	3,14	3,05	3,47	3,22	1,97	1,88	2,22	2,02	0,16	0,16	0,09	0,14
			0,1-0,2	3,23	3,02	3,59	3,28	2,07	1,92	2,36	2,12	0,10	0,09	0,07	0,09
PC	AV/MC	180	0-0,025	3,08	2,66	3,26	3,00	2,31	2,31	3,04	2,55	0,35	0,27	0,39	0,33
			0,025-0,05	2,57	2,54	2,75	2,62	1,72	1,69	2,11	1,84	0,40	0,19	0,31	0,30
			0,05-0,1	2,63	3,08	3,05	2,92	1,77	1,74	1,97	1,83	0,33	0,10	0,22	0,22
			0,1-0,2	3,20	3,17	3,50	3,29	1,98	2,05	2,16	2,06	0,22	0,08	0,12	0,14

Apêndice 10. Continuação...

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Dose N (kg ha ⁻¹)	Camada (m)	Ca				Mg				K			
				I	II	III	média	I	II	III	média	I	II	III	média
				----- cmol _c kg ⁻¹ de solo -----											
PD	A/M	0	0-0,025	4,54	4,75	4,54	4,61	3,57	3,43	3,49	3,50	0,51	0,46	0,52	0,49
			0,025-0,05	4,09	4,15	3,83	4,02	2,84	2,76	2,59	2,73	0,38	0,29	0,39	0,35
			0,05-0,1	3,89	3,89	3,65	3,81	2,59	2,53	2,23	2,45	0,27	0,20	0,25	0,24
			0,1-0,2	4,01	3,59	3,50	3,70	2,49	2,36	2,12	2,33	0,20	0,14	0,21	0,19
PD	A/M	180	0-0,025	3,92	4,84	3,92	4,22	3,05	4,13	4,01	3,73	0,59	0,56	0,38	0,51
			0,025-0,05	3,41	4,75	3,53	3,90	2,55	3,46	3,41	3,14	0,39	0,35	0,28	0,34
			0,05-0,1	2,72	3,68	3,26	3,22	2,10	2,82	2,54	2,49	0,25	0,23	0,19	0,23
			0,1-0,2	3,11	3,56	3,86	3,51	2,13	2,25	2,64	2,34	0,21	0,20	0,09	0,17
PD	V/M	0	0-0,025	4,63	4,24	3,56	4,14	4,07	3,55	3,19	3,60	0,38	0,50	0,36	0,41
			0,025-0,05	3,77	4,21	3,20	3,73	2,88	3,20	2,47	2,85	0,24	0,28	0,23	0,25
			0,05-0,1	3,32	3,47	2,54	3,11	2,52	2,74	2,09	2,45	0,18	0,16	0,16	0,17
			0,1-0,2	3,29	2,99	2,81	3,03	2,25	2,05	1,85	2,05	0,12	0,11	0,10	0,11
PD	V/M	180	0-0,025	3,50	3,53	3,17	3,40	3,08	3,74	2,93	3,25	0,28	0,29	0,32	0,30
			0,025-0,05	2,90	3,23	2,36	2,83	2,33	3,18	2,04	2,52	0,19	0,17	0,20	0,19
			0,05-0,1	2,42	2,96	2,33	2,57	1,97	2,45	1,72	2,05	0,18	0,12	0,13	0,15
			0,1-0,2	2,48	2,69	2,48	2,55	1,97	1,93	1,66	1,85	0,14	0,10	0,08	0,11
PD	AV/MC	0	0-0,025	4,60	5,02	4,33	4,65	3,57	3,84	3,68	3,70	0,65	0,41	0,72	0,59
			0,025-0,05	3,62	4,06	3,68	3,79	2,71	2,93	2,77	2,80	0,42	0,24	0,49	0,38
			0,05-0,1	2,93	3,62	2,63	3,06	2,25	2,47	1,98	2,23	0,26	0,17	0,36	0,27
			0,1-0,2	3,44	4,06	2,93	3,48	2,37	2,72	1,92	2,33	0,18	0,12	0,18	0,16
PD	AV/MC	180	0-0,025	3,59	5,02	4,30	4,30	3,10	4,51	3,42	3,68	0,31	0,38	0,40	0,36
			0,025-0,05	3,71	3,68	2,93	3,44	2,84	2,73	2,96	2,84	0,20	0,20	0,22	0,21
			0,05-0,1	3,29	3,08	2,87	3,08	2,47	2,43	2,46	2,45	0,20	0,13	0,15	0,16
			0,1-0,2	2,27	2,60	2,69	2,52	2,34	2,40	2,38	2,37	0,15	0,09	0,12	0,12

¹PC: preparo convencional e PD: plantio direto.

²A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 11. Teores de P nos blocos I, II, III e na média no solo manejado sob sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	P							
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹			
			I	II	III	média	I	II	III	média
			----- mg kg ⁻¹ de solo -----							
PC	A/M	0-0,025	22,15	28,12	21,87	24,05	26,41	45,72	40,19	37,44
		0,025-0,05	19,74	26,27	20,16	22,06	23,29	37,35	28,26	29,63
		0,05-0,1	15,34	25,28	18,32	19,64	22,29	32,80	32,38	29,16
		0,1-0,2	15,62	23,86	13,06	17,51	21,87	26,13	32,38	26,79
PC	V/M	0-0,025	30,53	29,39	35,64	31,86	15,19	17,32	16,90	16,47
		0,025-0,05	16,90	15,34	19,74	17,32	11,79	12,50	14,63	12,97
		0,05-0,1	13,35	11,08	13,92	12,78	11,64	14,06	20,45	15,38
		0,1-0,2	12,50	12,50	14,20	13,06	10,08	14,20	14,06	12,78
PC	AV/MC	0-0,025	20,87	26,27	18,83	21,99	11,93	22,58	11,93	15,48
		0,025-0,05	17,18	20,31	14,96	17,48	15,90	18,74	14,61	16,42
		0,05-0,1	14,63	26,55	8,24	16,47	12,21	19,03	8,52	13,25
		0,1-0,2	13,35	18,46	9,68	13,83	10,79	14,20	11,26	12,08
PD	A/M	0-0,025	83,66	85,62	90,96	86,75	61,05	48,77	48,77	52,87
		0,025-0,05	70,49	76,54	73,51	73,51	48,77	43,25	51,80	47,94
		0,05-0,1	37,91	55,36	49,84	47,70	33,82	43,61	38,80	38,74
		0,1-0,2	19,05	15,31	26,34	20,23	14,60	39,34	8,72	20,89
PD	V/M	0-0,025	46,10	56,96	43,61	48,89	36,13	39,16	49,28	41,52
		0,025-0,05	42,36	42,72	34,00	39,69	27,06	37,56	40,58	35,07
		0,05-0,1	22,07	31,33	27,41	26,94	19,05	31,68	33,46	28,06
		0,1-0,2	13,35	25,70	14,95	18,00	11,75	14,06	19,94	15,25
PD	AV/MC	0-0,025	43,61	56,43	62,66	54,23	45,57	85,44	56,60	62,54
		0,025-0,05	30,26	59,45	43,08	44,26	36,49	64,61	48,42	49,84
		0,05-0,1	20,65	53,76	38,63	37,68	37,38	50,20	38,80	42,13
		0,1-0,2	11,21	34,00	40,58	28,60	15,84	19,58	19,94	18,45

¹PC: preparo convencional e PD: plantio direto. ²A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 12. Valores de alumínio (Al) trocável nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	Al trocável							
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹			
			I	II	III	média	I	II	III	média
----- cmol _c kg ⁻¹ de solo -----										
PC	A/M	0-0,025	0,06	0,22	0,10	0,13	0,15	0,19	0,41	0,25
		0,025-0,05	0,06	0,28	0,11	0,15	0,27	0,51	0,51	0,43
		0,05-0,1	0,06	0,32	0,15	0,18	0,11	0,42	0,49	0,34
		0,1-0,2	0,09	0,23	0,12	0,15	0,09	0,30	0,46	0,28
PC	V/M	0-0,025	0,66	0,20	0,39	0,42	0,77	0,35	0,66	0,59
		0,025-0,05	0,94	0,44	0,78	0,72	1,10	0,58	1,07	0,92
		0,05-0,1	0,64	0,50	0,52	0,55	1,13	0,57	0,94	0,88
		0,1-0,2	0,59	0,28	0,63	0,50	0,94	0,42	0,97	0,78
PC	AV/MC	0-0,025	0,31	0,32	0,13	0,26	0,51	0,45	0,17	0,38
		0,025-0,05	0,54	0,59	0,35	0,49	0,76	0,91	0,44	0,70
		0,05-0,1	0,52	0,59	0,28	0,46	0,64	0,76	0,51	0,63
		0,1-0,2	0,46	0,46	0,29	0,40	0,61	0,51	0,40	0,51
PD	A/M	0-0,025	0,17	0,05	0,22	0,15	0,16	0,10	0,16	0,14
		0,025-0,05	0,18	0,24	0,35	0,26	0,55	0,12	0,40	0,36
		0,05-0,1	0,25	0,20	0,25	0,24	0,43	0,20	0,49	0,37
		0,1-0,2	0,22	0,25	0,49	0,32	0,39	0,51	0,29	0,40
PD	V/M	0-0,025	0,09	0,15	0,29	0,18	0,38	0,33	0,46	0,39
		0,025-0,05	0,24	0,26	0,57	0,36	0,87	0,59	1,11	0,86
		0,05-0,1	0,38	0,52	1,05	0,65	0,97	0,73	1,35	1,02
		0,1-0,2	0,45	1,10	1,10	0,88	0,84	1,20	1,21	1,08
PD	AV/MC	0-0,025	0,16	0,12	0,18	0,15	0,37	0,23	0,37	0,32
		0,025-0,05	0,22	0,23	0,32	0,26	0,64	0,36	0,84	0,61
		0,05-0,1	0,35	0,39	0,63	0,45	0,78	0,45	1,14	0,79
		0,1-0,2	0,42	0,38	1,23	0,67	0,57	0,51	1,54	0,87

¹PC: preparo convencional e PD: plantio direto. ²A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 13. Valores de pH água nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	pH água									
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹					
			I	II	III	média	I	II	III	média		
PC	A/M	0-0,025	5,19	4,85	4,97	5,00	5,23	5,16	5,16	5,18		
		0,025-0,05	5,08	4,73	4,90	4,90	4,83	4,66	4,65	4,71		
		0,05-0,1	4,98	4,72	4,96	4,89	5,12	4,77	4,68	4,86		
		0,1-0,2	5,13	4,93	5,12	5,06	5,19	4,64	4,54	4,79		
		0,2-0,3	5,02	4,61	4,90	4,84	4,66	4,38	4,58	4,54		
		0,3-0,4	4,62	4,49	4,55	4,55						
		0,4-0,5	4,58	4,52	4,51	4,54						
		0,5-0,6	4,56	4,40	4,36	4,44						
		0,6-0,8	4,51	4,34	4,40	4,42						
PC	V/M	0-0,025	4,64	4,92	4,88	4,81	4,60	4,82	4,56	4,66		
		0,025-0,05	4,55	4,77	4,59	4,64	4,36	4,61	4,45	4,47		
		0,05-0,1	4,73	4,80	4,83	4,79	4,31	4,59	4,43	4,44		
		0,1-0,2	4,76	4,92	4,84	4,84	4,50	4,73	4,41	4,55		
		0,2-0,3	4,58	4,87	4,78	4,74	4,42	4,83	4,37	4,54		
		PC	AV/MC	0-0,025	4,64	4,57	4,85	4,69	5,50	5,51	5,41	5,47
				0,025-0,05	4,40	4,45	4,50	4,45	4,81	4,48	4,70	4,66
				0,05-0,1	4,41	4,42	4,51	4,45	4,62	4,53	4,63	4,59
				0,1-0,2	4,44	4,51	4,62	4,52	4,55	4,81	4,80	4,72
0,2-0,3	4,29			4,48	4,63	4,47	4,69	4,73	5,00	4,81		
PD	A/M			0-0,025	5,45	5,42	5,47	5,48	5,52	5,17	4,84	5,32
				0,025-0,05	5,47	5,36	5,29	5,37	4,84	5,31	4,89	5,01
				0,05-0,1	5,31	4,83	5,22	5,12	4,87	5,13	4,83	4,94
				0,1-0,2	5,16	5,12	5,08	5,12	5,00	4,83	5,14	4,99
		0,2-0,3	4,76	4,83	4,58	4,72	4,78	4,77	5,13	4,89		
PD	V/M	0-0,025	5,11	4,85	5,05	5,04	4,95	4,96	4,62	4,95		
		0,025-0,05	5,05	4,93	4,73	4,90	4,62	4,43	4,70	4,58		
		0,05-0,1	5,00	5,12	4,81	4,98	4,48	4,48	4,64	4,53		
		0,1-0,2	5,13	4,71	4,67	4,84	4,43	3,85	3,59	3,96		
		0,2-0,3	4,90	4,46	4,62	4,66	3,61	3,44	3,46	3,50		
PD	AV/MC	0-0,025	4,65	4,95	4,40	4,76	4,97	4,62	4,35	4,76		
		0,025-0,05	4,40	4,26	4,40	4,35	4,35	4,61	4,42	4,46		
		0,05-0,1	4,12	4,08	4,12	4,11	4,28	4,52	4,22	4,34		
		0,1-0,2	4,36	4,17	3,91	4,15	4,47	4,58	4,16	4,40		
		0,2-0,3	3,96	4,10	3,86	3,97	4,42	4,50	4,16	4,36		
		0,3-0,4					4,33	4,08	4,24	4,26		
		0,4-0,5					4,24	4,28	4,06	4,19		
		0,5-0,6					4,22	4,24	4,16	4,21		
		0,6-0,8					4,24	4,25	4,15	4,21		
		0,8- 1,0				4,26	4,26	4,18	4,23			

¹ PC: preparo do solo, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 14. Valores de pH SMP nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	pH SMP							
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹			
			I	II	III	média	I	II	III	média
PC	A/M	0-0,025	6,22	6,08	6,25	6,18	6,25	6,09	6,07	6,14
		0,025-0,05	6,31	6,09	6,24	6,21	6,25	6,24	5,91	6,13
		0,05-0,1	6,26	6,03	6,22	6,17	6,24	5,94	5,97	6,05
		0,1-0,2	6,28	6,13	6,22	6,21	6,27	5,78	5,86	5,97
		0,2-0,3	6,02	5,68	6,03	5,91	5,74	5,51	5,75	5,67
		0,3-0,4	5,57	5,51	5,47	5,52				
		0,4-0,5	5,42	5,30	5,48	5,40				
		0,5-0,6	5,38	5,31	5,42	5,37				
		0,6-0,8	5,55	5,34	5,32	5,40				
PC	V/M	0-0,025	5,78	5,99	5,91	5,89	5,72	5,92	5,70	5,78
		0,025-0,05	5,65	5,89	5,71	5,75	5,54	5,79	5,53	5,62
		0,05-0,1	5,80	5,94	5,77	5,84	5,53	5,81	5,62	5,65
		0,1-0,2	5,82	5,95	5,80	5,86	5,68	5,95	5,61	5,75
		0,2-0,3	5,66	5,81	5,47	5,65	5,63	5,96	5,59	5,73
PC	AV/MC	0-0,025	5,93	5,90	6,15	5,99	5,86	5,86	6,07	5,93
		0,025-0,05	5,74	5,78	5,99	5,84	5,68	5,66	5,91	5,75
		0,05-0,1	5,78	5,81	6,01	5,87	5,81	5,73	5,99	5,84
		0,1-0,2	5,75	5,87	6,05	5,89	5,77	5,78	6,07	5,87
		0,2-0,3	5,58	5,67	5,85	5,70	5,71	5,75	6,11	5,86
PD	A/M	0-0,025	6,41	6,28	6,21	6,30	6,08	6,28	6,02	6,13
		0,025-0,05	6,37	6,28	6,18	6,28	5,82	6,18	5,90	5,97
		0,05-0,1	6,32	6,09	6,11	6,17	6,03	6,11	6,02	6,05
		0,1-0,2	6,17	6,06	5,99	6,07	6,18	5,97	6,21	6,12
		0,2-0,3	5,77	5,82	5,48	5,69	5,92	5,92	5,95	5,93
PD	V/M	0-0,025	6,00	5,87	5,86	5,91	5,75	5,73	5,79	5,76
		0,025-0,05	6,02	5,82	5,75	5,86	5,90	5,70	5,83	5,81
		0,05-0,1	6,05	5,91	5,81	5,92	5,71	5,64	5,65	5,67
		0,1-0,2	6,18	5,85	5,75	5,93	5,55	5,39	5,39	5,44
		0,2-0,3	6,04	5,57	5,64	5,75	5,37	5,06	5,25	5,23
PD	AV/MC	0-0,025	5,71	5,74	5,65	5,70	5,64	5,59	5,38	5,54
		0,025-0,05	5,70	5,58	5,54	5,61	5,52	5,53	5,32	5,46
		0,05-0,1	5,75	5,69	5,49	5,64	5,64	5,67	5,41	5,57
		0,1-0,2	5,80	5,75	5,37	5,64	5,68	5,80	5,30	5,59
		0,2-0,3	5,53	5,50	5,05	5,36	5,65	5,57	5,01	5,41
		0,3-0,4					5,41	5,26	4,68	5,12
		0,4-0,5					5,32	5,14	4,75	5,07
		0,5-0,6					5,28	5,08	4,76	5,04
		0,6-0,8					5,31	5,11	4,87	5,10
		0,8- 1,0				5,45	5,35	4,97	5,26	

¹ PC: preparo do solo, PD: plantio direto.

² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 15. Valores de acidez potencial (H+Al) nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	H+Al							
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹			
			I	II	III	média	I	II	III	média
			----- cmol _c kg ⁻¹ de solo -----							
PC	A/M	0-0,025	3,24	4,16	3,66	3,68	3,51	4,39	4,52	4,14
		0,025-0,05	3,40	4,18	3,61	3,73	3,47	4,52	4,83	4,27
		0,05-0,1	3,28	4,20	3,68	3,72	3,72	4,45	4,71	4,29
		0,1-0,2	3,59	4,12	3,99	3,90	3,64	4,22	4,24	4,03
PC	V/M	0-0,025	4,75	3,97	4,54	4,42	5,11	4,35	5,19	4,88
		0,025-0,05	4,92	4,50	4,94	4,78	5,27	4,24	5,59	5,04
		0,05-0,1	5,09	4,20	4,60	4,63	5,25	4,52	5,19	4,99
		0,1-0,2	4,62	3,97	4,64	4,41	5,25	4,45	5,57	5,09
PC	AV/MC	0-0,025	4,62	4,43	3,61	4,22	5,00	5,11	3,99	4,70
		0,025-0,05	4,81	4,87	3,97	4,55	5,36	5,78	4,71	5,28
		0,05-0,1	4,87	4,92	4,12	4,64	5,09	5,00	4,14	4,74
		0,1-0,2	4,62	4,81	4,01	4,48	4,87	4,92	4,43	4,74
PD	A/M	0-0,025	3,51	4,18	4,66	4,12	4,87	4,35	5,21	4,81
		0,025-0,05	3,64	3,93	3,91	3,82	5,40	4,08	5,09	4,85
		0,05-0,1	3,66	3,97	3,85	3,82	4,40	3,82	4,39	4,21
		0,1-0,2	3,40	3,74	3,95	3,70	3,97	5,00	3,68	4,22
PD	V/M	0-0,025	4,98	5,51	5,86	5,45	5,72	6,16	5,80	5,89
		0,025-0,05	4,64	5,67	5,48	5,27	6,30	5,82	6,20	6,11
		0,05-0,1	4,10	5,11	4,96	4,72	5,02	5,25	5,40	5,23
		0,1-0,2	3,91	5,11	5,04	4,69	4,29	5,06	4,94	4,76
PD	AV/MC	0-0,025	4,54	4,77	5,15	4,82	5,30	5,67	6,47	5,81
		0,025-0,05	5,06	5,25	5,40	5,24	5,78	5,97	5,06	5,60
		0,05-0,1	3,93	4,90	5,15	4,66	5,00	5,11	6,96	5,69
		0,1-0,2	3,93	4,06	5,67	4,55	4,43	4,01	4,39	4,28

¹ PC: preparo do solo, PD: plantio direto. ² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 16. Valores de CTC efetiva nos blocos I, II, III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	CTC efetiva							
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹			
			I	II	III	média	I	II	III	média
			----- cmol _c kg ⁻¹ de solo -----							
PC	A/M	0-0,025	7,07	6,41	6,53	6,67	6,42	6,51	6,41	6,45
		0,025-0,05	6,90	5,88	6,31	6,36	6,55	5,99	5,62	6,05
		0,05-0,1	6,25	6,41	6,78	6,48	6,55	5,42	5,49	5,82
		0,1-0,2	6,77	6,23	7,13	6,71	6,47	6,41	6,02	6,30
PC	V/M	0-0,025	5,48	6,33	6,53	6,11	5,29	6,02	5,89	5,73
		0,025-0,05	5,78	5,80	6,29	5,96	5,45	5,52	5,33	5,43
		0,05-0,1	5,36	6,17	6,03	5,85	5,30	5,75	5,57	5,54
		0,1-0,2	5,68	5,98	5,90	5,85	5,53	5,55	5,73	5,60
PC	AV/MC	0-0,025	6,54	5,82	6,49	6,29	6,18	5,68	6,86	6,24
		0,025-0,05	5,68	5,45	5,68	5,60	5,44	5,34	5,61	5,46
		0,05-0,1	5,80	5,69	6,05	5,85	5,37	5,68	5,58	5,54
		0,1-0,2	5,87	5,50	6,31	5,89	6,02	5,81	6,06	5,96
PD	A/M	0-0,025	8,79	8,68	8,77	8,75	7,71	9,63	8,46	8,60
		0,025-0,05	7,49	7,44	7,15	7,36	6,67	8,69	7,62	7,66
		0,05-0,1	7,00	6,83	6,38	6,74	5,51	6,93	6,28	6,24
		0,1-0,2	6,91	6,34	6,32	6,53	5,85	6,52	6,87	6,41
PD	V/M	0-0,025	9,17	8,43	7,38	8,33	7,23	7,85	6,81	7,30
		0,025-0,05	7,13	7,97	6,47	7,19	6,31	7,03	5,50	6,28
		0,05-0,1	6,40	6,86	5,84	6,37	5,44	6,20	5,29	5,64
		0,1-0,2	6,24	6,25	5,86	6,12	5,34	5,72	5,36	5,47
PD	AV/MC	0-0,025	8,98	9,39	8,90	9,09	7,37	10,16	8,49	8,67
		0,025-0,05	6,95	7,46	7,25	7,22	7,39	6,97	6,95	7,10
		0,05-0,1	5,79	6,65	5,60	6,01	6,73	6,10	6,62	6,48
		0,1-0,2	6,41	7,29	6,33	6,67	5,33	5,60	6,73	5,89

¹ PC: preparo do solo, PD: plantio direto. ² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.

Apêndice 17. Valores de CTC pH 7,0 nos blocos I, II e III e na média num Argissolo manejado sob diferentes sistemas de preparo do solo, sistemas de culturas e doses de N mineral

Preparo solo ¹	Sistema cultura ²	Camada (m)	CTC pH 7,0							
			0 kg N ha ⁻¹				180 kg N ha ⁻¹			
			I	II	III	média	I	II	III	média
			----- cmol _c kg ⁻¹ de solo -----							
PC	A/M	0-0,025	10,24	10,35	10,09	10,23	9,79	10,71	10,67	10,39
		0,025-0,05	10,24	9,78	9,81	9,94	9,87	9,99	9,94	9,94
		0,05-0,1	9,46	10,29	10,31	10,02	10,16	9,46	9,71	9,78
		0,1-0,2	10,27	10,12	11,00	10,47	10,02	10,33	9,98	10,11
PC	V/M	0-0,025	9,71	10,09	10,67	10,16	9,63	10,02	10,42	10,02
		0,025-0,05	9,94	9,86	10,61	10,14	9,62	9,18	9,84	9,55
		0,05-0,1	9,80	9,88	10,11	9,93	9,43	9,70	9,82	9,65
		0,1-0,2	9,71	9,67	9,91	9,77	9,84	9,59	10,33	9,92
PC	AV/MC	0-0,025	10,85	9,94	9,97	10,25	10,73	10,34	10,68	10,58
		0,025-0,05	9,95	9,73	9,30	9,66	10,05	10,21	9,87	10,04
		0,05-0,1	10,15	10,01	9,90	10,02	9,81	9,93	9,39	9,71
		0,1-0,2	10,03	9,85	10,04	9,97	10,28	10,22	10,21	10,23
PD	A/M	0-0,025	12,13	12,82	13,21	12,72	12,43	13,88	13,52	13,27
		0,025-0,05	10,94	11,13	10,71	10,93	11,75	12,64	12,30	12,23
		0,05-0,1	10,40	10,59	9,98	10,32	9,48	10,55	10,38	10,14
		0,1-0,2	10,10	9,83	9,78	9,91	9,42	11,01	10,26	10,23
PD	V/M	0-0,025	14,06	13,79	12,97	13,61	12,58	13,72	12,23	12,84
		0,025-0,05	11,54	13,38	11,39	12,10	11,72	12,40	10,80	11,64
		0,05-0,1	10,12	11,47	9,75	10,45	9,60	10,78	9,58	9,99
		0,1-0,2	9,57	10,26	9,81	9,88	8,88	9,79	9,16	9,28
PD	AV/MC	0-0,025	13,36	14,04	13,88	13,76	12,29	15,58	14,59	14,16
		0,025-0,05	11,80	12,49	12,33	12,21	12,53	12,58	11,17	12,09
		0,05-0,1	9,37	11,15	10,12	10,21	10,96	10,75	12,44	11,38
		0,1-0,2	9,92	10,96	10,70	10,53	9,20	9,11	9,58	9,29

¹ PC: preparo do solo, PD: plantio direto ² A/M: aveia/milho, V/M: vica/milho, AV/MC: aveia+vica/milho+caupi.