

Sys 3M335



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

QUALIDADE DO SISTEMA SOLO NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

FABIANE MACHADO VEZZANI
(Mestre em Ciência do Solo, UFRGS)

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

AGR
T
631.4
V597q

Porto Alegre (RS), Brasil
Outubro/2001

FABIANE MACHADO VEZZANI
Engenheiro Agrônomo - UFRGS
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

TESE

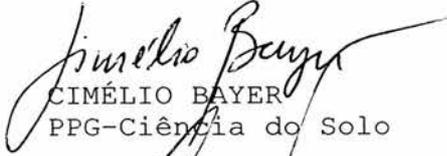
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

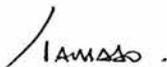
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: 30.10.01
Pela Banca Examinadora


JOÃO MIELNICZUK
Orientador-PPG-Ciência do Solo

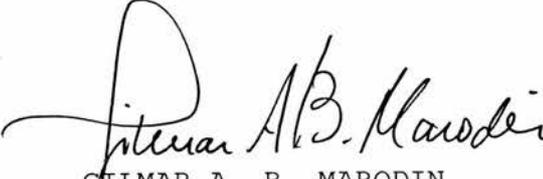

CIMÉLIO BAYER
PPG-Ciência do Solo


SANDRA BEATRIZ VICENCI FERNANDES
UNIUI


TELMO JORGE CARNEIRO AMADO
UFSM

Homologado em: 21.11.01
Por


PEDRO ALBERTO SELBACH
Coordenador do Programa
de Pós-Graduação em Ciência
do Solo


GILMAR A. B. MARODIN
Diretor da Faculdade de
Agronomia

"A vida só é possível num universo longe do equilíbrio."

Ilya Prigogine

Dedico este trabalho aos meus pais
Sérgio Cléo e Maria Carmem,
por terem proporcionado
a construção da minha estrutura e
o convívio das minhas irmãs
Suane e Silviane.

Nesta família, conheci o AMOR,
que faz eu buscar ser melhor a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor João Mielniczuk, por eu ter obtido a formação na Universidade Pública e o convívio diário com cientistas do solo de todo o Brasil. Por ter possibilitado este trabalho e ter promovido oportunidades para o meu crescimento profissional. Por permitir a minha *viagem* na complexidade dos sistemas abertos. Pela troca de idéias filosóficas. Pelo apoio nos momentos de incertezas, indicando o caminho. Pela compreensão de que somos *sistemas vivos*, com *propriedades emergentes* das mais diversas possíveis. E pela sua grandeza de espírito. Ao Professor João meu grande apreço.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela minha formação acadêmica.

À CAPES pela bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade e estrutura de realizar o curso.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelo aprendizado. Em especial aos Professores Pedro Selbach e Nestor Kämpf pelas sugestões no trabalho.

Ao Professor Jacques Marre, do Departamento de Sociologia da UFRGS, pela luz inicial, bibliografias, discussões e, principalmente, por mostrar o *novo*.

Ao Professor Bardo Bodmann, do Departamento de Física da Unisinos, pela disposição em colaborar no trabalho. Pela orientação, bibliografias e discussões.

Ao colega e Professor Alberto Inda Junior, do Departamento de Solos da UFRGS, pela grande colaboração em elaborar a metodologia de separar as partículas simples na fração $< 0,053$ mm.

À Leila Souza, do Departamento de Zootecnia da UFRGS, pela incansável ajuda em buscar *energia* dentro do solo.

Aos funcionários do Departamento de Solos da UFRGS: José, pelo sorriso e bom humor em cada dia de trabalho. E Adão Luis, pela colaboração e dicas no laboratório.

Às funcionárias da secretaria do Departamento de Solos da UFRGS e ao Jader, do Pós-Graduação, sempre prontos a atender os mais diversos pedidos e a responder as dúvidas.

Aos colegas do curso pelas discussões, aprendizados e parcerias, que tornaram o dia-a-dia mais feliz.

À família Mielniczuk pelo carinho. À Jussára pela torcida constante e pela sensibilidade de perceber os momentos mais delicados, oferecendo uma palavra amiga. À Luciana e ao Fabiano, por compartilharem o trabalho.

Aos colegas de orientação: Thomé, Pillon, Flavia, Lucio e Jeferson, pelo agradável convívio. As discussões, a colaboração, o trabalho em conjunto e a amizade foram fundamentais para o meu crescimento profissional e emocional.

Às amigas Ana Gabriela e Maria Beatriz, por estarem SEMPRE presentes.

Aos meus tios José Américo, Kátia, João Carlos e Jussara, pela torcida.

Aos meus primos Rodrigo, Gustavo, Juliana, Daniel e Marcelo, pela alegria do convívio.

Aos meus cunhados Hugo e Alberto, pela força.

Aos meus pais Sérgio Cléo e Maria Carmem, por serem VERDADEIRAMENTE pai e mãe.

Às minhas irmãs Suane e Silviane, por serem AMIGAS, no sentido mais nobre que esta palavra pode expressar.

Às minhas sobrinhas Augusta, Roberta e Sofia, que fizeram eu conhecer um outro lado do amor.

QUALIDADE DO SISTEMA SOLO NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA^{1/}

AUTOR: Fabiane Machado Vezzani
ORIENTADOR: Prof. João Mielniczuk

RESUMO

No último século, a elevada degradação dos recursos naturais fez surgir o interesse mundial em identificar qualidade do solo. Este interesse está baseado na consciência de que o solo é um dos agentes reguladores dos grandes ciclos da biosfera terrestre. Qualidade do solo é definida como a capacidade de um solo exercer suas funções na natureza. Em função disto, buscou-se compreender o funcionamento do solo, estudando os princípios da termodinâmica do não-equilíbrio, pois é o ramo da ciência que abrange os sistemas abertos. Neste trabalho, pressupõem-se que o adequado funcionamento do solo capacita o mesmo produzir alimentos, enquanto incrementa sua qualidade. O sistema solo é o resultado de complexas interações dos subsistemas mineral, plantas e microrganismos. O seu funcionamento ocorre pela passagem do fluxo de energia e matéria, o qual se caracteriza pela entrada de compostos orgânicos, adicionados pelas plantas e transformados pelos microrganismos. Conforme este fluxo, o sistema se auto-organiza em estados de ordem, os quais são representados, de certa forma, pela hierarquia de agregação do solo. O processo de agregação consiste na formação em seqüência de estruturas cada vez mais complexas, conduzida pela entrada de compostos orgânicos. Estas estruturas possuem níveis de ordem, que aumentam conforme aumenta a interação entre os minerais, as plantas e os microrganismos. O estado de ordem em nível alto é caracterizado pela maior proporção de macroagregados e quantidade de carbono retido, gerando propriedades emergentes que capacitam o sistema solo exercer suas funções e, assim, atingir qualidade. Sistemas solo foram analisados quanto ao fluxo de energia e matéria e aos estados de ordem resultantes, com o objetivo de avaliar o seu funcionamento na produção agrícola. Para isto, utilizou-se simulações pelo modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo e determinações de classes de agregados e de carbono orgânico total do solo em experimento de longa duração. Com os dados, buscou-se identificar práticas de manejo que favoreçam a qualidade do sistema solo. A partir dos resultados obtidos, estas práticas de manejo consistem na adição contínua e diversificada de energia e matéria, via cultivo de plantas, e o não revolvimento do solo.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, (184p.) Outubro, 2001.

SOIL SYSTEM QUALITY IN THE AGRICULTURAL PRODUCTION^{1/}

AUTHOR: Fabiane Machado Vezzani
ADVISER: Prof. João Mielniczuk

SUMMARY

The intense degradation of the natural resources in the last century brought to the world the interest in identifying the soil quality. This interest is based on the awareness that the soil is one of the balancing agents of the greatest earth biosphere cycles. Soil quality is defined as the capacity of it to have its functions in the environmental. Because of that it has been tried to understand the soil performance through the studying of the non-equilibrium thermodynamic, which is the science that studies the open systems. It is assumed in this work that the appropriate function of the soil enables it to produce food while getting better quality. The soil system is the result of a complex interaction among the mineral, the plants and the microorganisms systems. Its functioning is determined by the addition of organic compounds by plants that undergoes microbiological transformations in the soil, representing the flow of energy and matter through it. According to this flow the soil system self-organizes in states of orders which are represented, in a way, by the soil aggregation hierarchy. The process of the soil aggregation is the sequence formation of more complex structures led by the organic compounds entrance and biological activity. These structures have order levels that increase as the interaction among mineral, plants and microorganisms increases. The high level order state is characterized by the higher proportions of macroaggregates and the amount of carbon retained, resulting in properties that enable the soil system to function adequately and reach quality. Soil systems were analyzed through the flow of energy and matter and the resulting order states, in order to evaluate the soil system performance in the agricultural production. Total soil organic carbon accumulation, soil aggregation and balance between carbon addition and losses by the Century soil organic matter model in long term experiment were determined. With the data, management practices were identified in order to achieve the soil system quality. From the results obtained the practices are the continuous and diverse adding of energy and matter by plants and the no-tillage of the soil.

^{1/} Doctoral thesis in Soil Science. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (184p.) October, 2001.

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Práticas de manejo aplicadas nos sistemas solo, consideradas para a simulação no modelo Century 4.0.	67
2. Parâmetros do modelo Century 4.0 para os sistemas solo, valores estimados e observados de carbono adicionado pela parte aérea e raízes e de carbono orgânico total no solo em setembro de 1998	69
3. Quantidades de carbono adicionadas (ad) e liberadas (lib), em Mg ha ⁻¹ , o balanço entre elas (ad-lib) e a relação F/R (ad/lib) nos sistemas solo simulados no modelo Century 4.0 em diferentes tempos após o início dos eventos.	79
4. Características dos solos avaliados no Estudo 2.	92
5. Sistemas solo na área experimental em solo PVd desde 1983, Eldorado do Sul. .	93
6. Sistemas solo na área experimental em solo PVd desde 1985, Eldorado do Sul. .	94
7. Sistemas solo avaliados no Estudo 2.	97
8. Quantidade de carbono, em Mg ha ⁻¹ , adicionada anualmente pelas plantas nos sistemas solo cujos fluxos foram simulados no Estudo 1. Dados observados por Lovato (2001).	107
9. Valor relativo dos sistemas ao campo nativo correspondente quanto à quantidade de carbono total no solo e à proporção de agregados > 2 mm, e o nível de ordem dos sistemas solo cujos fluxos foram simulados no Estudo 1.	111
10. Quantidade de carbono, em Mg ha ⁻¹ , adicionada anualmente pelas plantas nos sistemas solo conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.	119
11. Valor relativo dos sistemas ao campo nativo correspondente quanto à quantidade de carbono total no solo e à proporção de agregados > 2 mm, e o nível de ordem dos sistemas solo conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.....	125

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE EM QUALIDADE DO SOLO	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1. Noções da Termodinâmica do Não-Equilíbrio	19
3.2. Caracterização do Sistema Solo	27
3.2.1. Subsistema Mineral	27
3.2.2. Subsistema Plantas	30
3.2.3. Subsistema Microrganismos	34
3.2.4. Fluxo de Energia e Matéria no Sistema Solo	35
3.2.5. Estados de Ordem do Sistema Solo	45
3.2.6. Funcionamento do Sistema Solo	53
3.3. Hipóteses	62
4. ESTUDO 1. FLUXO DE ENERGIA E MATÉRIA EM SISTEMAS SOLO	63
4.1. Materiais e Métodos	64
4.2. Resultados e Discussão	68
5. ESTUDO 2. ESTADOS DE ORDEM DE SISTEMAS SOLO	91
5.1. Materiais e Métodos	91
5.1.1. Local e Caracterização das Áreas Experimentais	92
5.1.1.1. PVd – área experimental conduzida desde 1983	93
5.1.1.2. PVd – área experimental conduzida desde 1985	93
5.1.1.3. PVd – área experimental conduzida desde 1970	94
5.1.1.4. PVd – Campo Nativo	95
5.1.1.5. PVAd – área experimental conduzida desde 1975.....	95
5.1.1.6. PVAd – Campo Nativo	96
5.1.1.7. LVdf – Campo Nativo	96
5.1.2. Determinação dos Agregados	96
5.1.2.1. Peneiragem Via Úmida	98
5.1.2.2. Peneiragem Via Seca	99

	Página
5.1.2.3. Separação das Partículas Simples	100
5.1.2.3.1. Classe > 4,76 mm	100
5.1.2.3.2. Classe 4,76-2,00 mm	100
5.1.2.3.3. Classe 2,00-0,25 mm	100
5.1.2.3.4. Classe 0,25-0,053 mm	101
5.1.2.3.5. Classe < 0,053 mm	101
5.1.2.4. Análise Estatística	102
5.1.3. Determinação do Carbono Total no Solo	102
5.1.3.1. Análise Estatística	103
5.2. Resultados e Discussão	103
5.2.1. Sistemas Solo cujos Fluxos foram Simulados no Estudo 1	103
5.2.2. Sistemas Solo Conduzidos Sem ou Com Baixo Grau de Revolvimento do Solo	116
5.2.3. Sistemas Solo em Vegetação de Campo Nativo	129
6. CONCLUSÕES	136
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
8. APÊNDICES	153

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Configuração de um sistema aberto (Capra, 1996).	21
2. Diagrama de bifurcações de um sistema em condições de não-equilíbrio (adaptada de Prigogine e Stengers, 1997).	22
3. Simulação numérica da função H de um sistema que tende ao equilíbrio (Prigogine e Stengers, 1992).	25
4. História de um sistema em condição de não-equilíbrio (adaptada de Prigogine, 1996).	26
5. Reações da fotossíntese nas plantas (Nelson e Cox, 2000).	31
6. Diagrama do fluxo de carbono no modelo Century (adaptada de Parton et al., 1987).	38
7. Representação do processo de agregação do sistema solo.	45
8. Representação do funcionamento do sistema solo.	55
9. Quantidade anual de carbono adicionada (A) e liberada (B), ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.	70
10. Carbono total no solo, ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0 e os dados observados por Lovato (2001) no décimo terceiro ano do experimento referência.	72
11. Balanço mensal de carbono nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0, nos 10 (A), 50 (B) e 150 (C) anos.	74
12. Balanço anual de carbono, ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.	78
13. Relação F/R, ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.	84

	Página
14. Processo de umedecimento das amostras para determinação dos agregados por peneiragem via úmida.	99
15. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVd, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1. Sistemas em preparo convencional (A) e sistemas em semeadura direta (B).	104
16. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas solo sobre PVd, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1.	106
17. Níveis de ordem dos sistemas solo sobre PVd, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1.	110
18. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVd, conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo. Combinações de alguns dos sistemas (A a C).	117
19. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas solo sobre PVd, conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.	121
20. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVAd.	123
21. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas solo sobre PVAd.	124
22. Níveis de ordem dos sistemas solo sobre PVd e PVAd, conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.	126
23. Relação entre as quantidades de solo agregado e de carbono total nos sistemas solo sobre PVd.	128
24. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas campo nativo de três diferentes tipos de solo.	130
25. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas campo nativo de três diferentes tipos de solo.	131
26. Representação esquemática dos patamares de níveis de ordem em função do fluxo de energia e matéria e dos componentes intrínsecos do sistema.	134

1. INTRODUÇÃO

No início do século passado, o homem tinha a concepção de que os recursos naturais estavam à sua disposição de forma ilimitada e utilizou-os sem preocupação com o futuro. Em função deste uso inadequado, ocorreu uma acelerada degradação ambiental. O solo, como um dos principais recursos naturais, está severamente comprometido.

Campos e florestas nativos foram convertidos à agricultura, baseada em práticas intensas de manejo com revolvimento do solo por máquinas cada vez mais pesadas e no uso excessivo de fertilizantes e agroquímicos. Os resultados foram as grandes perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica e eólica, as alterações da estrutura e da capacidade de retenção de água e o declínio vertiginoso do conteúdo de matéria orgânica dos solos.

Nestas condições, o solo perde as propriedades de regular os ciclos da água e de elementos como carbono, nitrogênio, enxofre, fósforo, potássio, dos quais uma parte ocorre no solo, e que caracteriza um dos seus principais papéis no ambiente terrestre. Além disso, é função do solo servir como substrato e fonte de nutrientes para a produtividade das plantas e, conseqüentemente, dos animais e atuar na formação, atenuação e degradação de compostos que são prejudiciais ao ambiente. Para manter a qualidade do ar e da água e o funcionamento geral da biosfera, o solo deve estar em condições de desempenhar as suas funções, para que a água e os elementos ciclem em velocidade e quantidade adequadas para todos os seres que habitam a Terra.

Na entrada dos anos 90, a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental, iniciou a discussão sobre “qualidade do solo” para abordar a preocupação com a degradação dos recursos naturais, a sustentabilidade agrícola e a função do solo neste contexto.

Atualmente, o desafio é realizar a agricultura e manter a qualidade dos recursos naturais. Acredita-se que se o adequado funcionamento do solo for respeitado, é possível produzir alimentos e, ao mesmo tempo, incrementar sua qualidade.

Em função disto, neste trabalho buscou-se compreender o funcionamento do solo, estudando os princípios da termodinâmica do não-equilíbrio, ramo da ciência que trata os sistemas abertos.

Sistemas abertos funcionam afastados do equilíbrio e, assim, são capazes de se auto-organizarem. A condição de não-equilíbrio é devido ao fluxo de energia e matéria que passa pelo sistema continuamente. E a auto-organização ocorre através das relações não-lineares entre os elementos que compõem o sistema, gerando estados de ordem relativos ao fluxo e dependentes da sua própria história. Quando o fluxo proporciona aumento na quantidade de energia e matéria retida, o sistema evolui e surgem estados de ordem em níveis sucessivamente mais elevados, caracterizados pela complexidade e diversidade das relações e da estrutura. Nesta condição, propriedades emergentes habilitam o sistema a exercer múltiplas funções.

Neste trabalho, parte-se da premissa que o sistema solo é o resultado de complexas interações entre os subsistemas mineral, plantas e microrganismos. Os fluxos de energia e matéria que passam pelo sistema solo, consistem nos fluxos de calor, de água e de compostos orgânicos. Os fluxos de calor e de água interferem diretamente no fluxo de compostos orgânicos, e este é determinante para a ordenação do sistema. A ordenação do sistema solo pode ser representada pela complexidade de processos ou de produtos.

Portanto, o fluxo de energia e matéria considerado neste trabalho ocorre através dos compostos orgânicos, que são provenientes da matéria vegetal produzida pelo subsistema plantas e transformada pelo subsistema microrganismos. A partir da entrada dos compostos orgânicos, o sistema solo se auto-organiza, através das relações não-lineares entre os subsistemas mineral, plantas e microrganismos, e atinge estados de ordem conforme o fluxo que passa por ele. Os estados de ordem são melhor representados pelo processo de agregação do solo, onde ocorre a formação de estruturas por interações organo-minerais e ação direta das plantas e organismos. Estas estruturas possuem níveis de ordem, que aumentam conforme aumentam as interações, e com isto seguem uma hierarquia, a qual representa a história dos sistemas abertos, no sentido de que a estrutura atual foi formada a partir de estruturas menores formadas anteriormente. O estado de ordem em nível alto é caracterizado pela presença de estruturas complexas e diversificadas e grande quantidade de energia e matéria retida, gerando propriedades emergentes que capacitam o sistema solo exercer suas funções e, assim, atingir qualidade.

Neste trabalho, sistemas solo foram analisados quanto ao fluxo de energia e matéria e aos estados de ordem resultantes, com o objetivo de realizar uma reflexão sobre o funcionamento do sistema solo na produção agrícola e construir subsídios para inferir sobre a sua qualidade.

2. ESTADO DA ARTE EM QUALIDADE DO SOLO

Na entrada dos anos 90, a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental, iniciou a discussão sobre qualidade do solo (QS) para abordar a preocupação com a degradação dos recursos naturais, a sustentabilidade agrícola e a função do solo neste contexto.

Lal e Pierce (1991) foram precursores, nesta fase, em alertar sobre a relação do manejo do solo e a sustentabilidade da agricultura. Os números alarmantes de áreas degradadas física e quimicamente, contaminadas por agroquímicos, e as perspectivas catastróficas fizeram Lal e Pierce (1991) instigar a comunidade científica a buscar sistemas de manejo inovadores, capazes de balancear o requerimento do solo e das culturas. *“A ênfase não está em maximizar a produção, mas sim em otimizar o uso do recurso e sustentar produtividade por um longo período”* alertaram eles.

Nesta época, a filosofia de trabalho do Instituto Rodale nos Estados Unidos, se tornou mais divulgada, a qual se fundamenta em que a saúde das pessoas está intimamente relacionada à saúde do solo. Harberern (1992), presidente do instituto, encorajou pesquisadores e estudantes a divulgar esta idéia, ressaltando que as soluções para os problemas da saúde humana estão na agricultura, em produzir alimentos de forma regenerativa, garantindo a saúde do homem a partir da saúde do solo.

Em 1992, o Jornal Americano de Agricultura Alternativa dedicou dois números à QS. Os trabalhos relacionaram sustentabilidade agrícola e QS, divulgando os

primeiros conceitos sobre a natureza e a importância do tema (American Journal of Alternative Agriculture, 1992).

Uma melhor definição de QS surgiu mais tarde, proposta por Doran e Parkin (1994) e reformulada por Doran (1997): “*QS é 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 dos homens*”. Em outras palavras, é a capacidade do solo exercer suas funções na natureza (Doran, 1997). Estas se caracterizam pela habilidade do solo funcionar como um meio para o crescimento das plantas, regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente, estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera e servir como um tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (Larson e Pierce, 1994; Karlen et al., 1997).

Sustentabilidade agrícola é definida como a capacidade de um sistema agrícola produzir alimentos e fibras sem comprometer as condições que tornam possível este processo de produção (Gliessman, 2000). A sustentabilidade está fundamentada em cinco pilares: produtividade, segurança, proteção, viabilidade e aceitabilidade (Smyth e Dumanski, 1995).

A relação entre QS e sustentabilidade agrícola reside que a produção de alimentos e fibras sobre um solo capaz de cumprir suas funções permite uma elevada produtividade, num processo de produção seguro ambientalmente, com proteção dos recursos naturais, sendo viável economicamente, e, portanto, aceito pela sociedade. QS é a base para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável (Wang e Gong, 1998; Doran e Zeiss, 2000), servindo como indicador para o manejo sustentável de terras (Herrick, 2000). A sustentabilidade agrícola depende da manutenção da QS ao longo do tempo.

O pensamento em relação à QS é identificar um índice, que seja capaz de servir como indicador, assim como existem indicadores para qualidade do ar e da água.

Cientistas do solo, agricultores e instituições governamentais tem o interesse de obter um índice de qualidade do solo (IQS), para auxiliar na avaliação de terras em relação à degradação, fazer estimativas de necessidades de pesquisa e de financiamentos, e julgar práticas de manejo utilizadas, a fim de monitorar as mudanças na sustentabilidade e na qualidade ambiental (Granatstein e Bezdicek, 1992; Harberern, 1992; Parr et al., 1992; Doran e Parkin, 1994; Doran, 1997, Huffman et al., 1998).

Um IQS deve identificar um conjunto de propriedades básicas do solo, atendendo aos seguintes critérios: elucidar processos do ecossistema e relacionar aos processos modelos; integrar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e os respectivos processos; ser acessível a muitos usuários e aplicável a condições de campo; ser sensível a variações de manejo e de clima ao longo do tempo; e, quando possível, ser componente de banco de dados já existente (Doran e Parkin, 1994). Além disto, os indicadores devem ser práticos para o uso tanto por cientistas, como por agricultores, extensionistas, ecologistas e instituições governamentais, numa ampla classe de situações ecológicas e sócio-econômicas (Granatstein e Bezdicek, 1992; Sanders, 1992; Doran e Parkin, 1994; Sherwood e Uphoff, 2000). Devem ser fáceis de medir e as medidas obtidas devem ser reprodutíveis (Gregorich et al., 1994; Seybold et al., 1998).

Arshad e Coen (1992) argumentam que um indicador adequado pode variar entre locais, dependendo do tipo ou uso do solo, de quais funções do solo são necessárias e dos fatores de formação do mesmo. Infiltração, por exemplo, não seria um indicador adequado para terras de várzeas, mas seria para as demais áreas agrícolas (Seybold et al., 1998).

Desde que iniciou a discussão sobre QS e sustentabilidade agrícola, praticamente todos os cientistas do solo pensam sobre o assunto. Linhas paralelas de pensamento surgiram. Uma linha procura identificar quais os melhores indicadores de QS, tanto de ordem física, química ou biológica. Outra linha se posiciona em relação ao

melhor indicador: matéria orgânica do solo. E, uma linha alternativa, que deixa de lado a busca de atributos e analisa processos no sistema solo-planta.

Na busca pelos melhores indicadores de QS Larson e Pierce (1994) e Doran e Parkin (1994) foram os pioneiros.

Doran e Parkin (1994) propuseram um conjunto básico de indicadores de ordem física, química e biológica: textura, profundidade de solo e de raízes, densidade do solo, infiltração, capacidade de armazenamento e retenção de água, conteúdo de água, temperatura do solo, C e N orgânico total, pH, condutividade elétrica, N mineral (NH_4 e NO_3), fósforo, potássio, C e N da biomassa microbiana, N potencialmente mineralizável, respiração do solo, C na biomassa em relação ao C orgânico total e respiração microbiana em relação à biomassa. Estes indicadores devem ser relacionados com cinco funções do solo: habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de água, habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de nutrientes e químicos, promover e sustentar o crescimento de plantas, manter um habitat biológico adequado, responder ao manejo resistindo à degradação. Para isto, os atributos referentes a cada função do solo, julgados pelos manejadores do índice, possuem um coeficiente de ponderação, que é relativo a considerações geográficas e sócio-econômicas e com base nos três pilares da QS: produção sustentável, qualidade ambiental e saúde humana e animal. O índice obtido é comparado com as condições que maximizam a produção e a performance ambiental.

Larson e Pierce (1994) propuseram a determinação de um Conjunto Mínimo de Dados (MDS) e funções pedotransfer (PTF). O MDS consiste na disponibilidade de nutrientes, C orgânico total e lábil, textura, capacidade de água disponível para as plantas, estrutura, densidade ou resistência à penetração de raízes, profundidade máxima de raízes, pH e condutividade elétrica. As PTF são funções matemáticas que relacionam características e propriedades do solo com atributos mensuráveis. Exemplos de PTFs

são a capacidade de adsorção de fósforo, que é relacionada com alumínio e ferro extraídos com oxalato, e a condutividade hidráulica, que é relacionada com a textura do solo. A QS é quantificada pela determinação de todos estes parâmetros, fazendo uma avaliação comparativa a um padrão ou a dinâmica do MDS e PTF no tempo.

Várias propostas de formas e fórmulas para avaliar a QS surgiram e, geralmente, estão relacionadas com a área de concentração dos pesquisadores. Alguns propuseram a avaliação de atributos químicos e físicos (Arshad e Coen, 1992; Karlen e Stott, 1994), outros de atributos biológicos (Stork e Eggleton, 1992; Bohlen e Edwards, 1994; Linden et al., 1994; Pankhurst, 1994) e outros, ainda, de atributos microbiológicos (Visser e Parkinson, 1992; Dick, 1994; Fauci e Dick, 1994; Turco et al., 1994; Kennedy e Papendick, 1995; Rice et al., 1996).

Smith et al. (1994) sugeriram o monitoramento da QS, integrando os atributos que definem QS em um índice. A partir deste, um mapa é produzido, o qual indica áreas na paisagem com probabilidades à QS, de acordo com os critérios pré-determinados.

Outros pesquisadores acreditam que uma avaliação qualitativa da QS, através da percepção pessoal, principalmente dos agricultores, é a aproximação ideal de um IQS (Harris e Bezdicek, 1994; Garyland et al., 1994, Romig et al., 1995). Nesta visão, o agricultor atribui notas para cada item de um questionário, que abrange propriedades referentes às plantas, aos animais e às condições químicas, físicas e biológicas do solo. Conforme o escore obtido, o solo é classificado em saudável, enfraquecido ou não saudável (Romig et al., 1996).

Doran (1994) desenvolveu um kit para testar QS a campo, o qual é recomendado pelo United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). O kit mede, entre outros atributos, densidade do solo, taxa de infiltração, capacidade de armazenamento de água, respiração do solo, condutividade elétrica, pH do solo e nitrato. A avaliação da QS é feita comparando os

atributos medidos entre os tratamentos estudados. Este kit está sendo utilizado e adaptado em mais de 50 locais nos Estados Unidos e em vários outros países (Sarrantonio et al., 1996).

Karlen e Stott (1994) propuseram um índice selecionando funções do solo consideradas relevantes. Para atingir estas funções são medidos atributos químicos e físicos do solo. Cada atributo é normalizado entre os valores 0 e 1, usando funções de padronização de escore, as quais foram desenvolvidas para problemas dos sistemas de engenharia. Ao final, obtém-se um valor que compara os tratamentos. Este método foi aplicado em tratamentos com 10 anos em semeadura direta, que diferiram na quantidade de resíduos deixados na superfície do solo. As funções consideradas relevantes foram: acomodação da água infiltrada, facilidade de transferência e absorção de água, resistência à degradação da superfície e suporte para crescimento das plantas. Os IQS obtidos foram 0,45, 0,68 e 0,86, respectivamente, quando os resíduos vegetais, na superfície do solo, foram removidos, mantidos e duplicados (Karlen et al., 1994a). Este mesmo método foi aplicado em tratamentos com 12 anos de diferentes preparos de solo: aração, escarificação e sem preparo. E os IQS obtidos foram 0,48, 0,49 e 0,68, respectivamente (Karlen et al., 1994b).

McQuaid e Olson (1998) utilizaram o método proposto por Karlen e Stott (1994) de padronizar os valores obtidos e derivar um IQS. O índice considera a determinação de C orgânico, C total, N total, pH, CTC, taxa de absorção de Na, condutividade elétrica, textura e estabilidade de agregados. Entre diferentes sistemas de manejo na região leste dos Estados Unidos, os autores concluíram que sistemas em preparo convencional do solo tiveram IQS mais baixo que sistemas em semeadura direta, considerando ou não indicadores relacionados à matéria orgânica do solo para o cálculo do IQS.

No Canadá, em 1993, iniciou o projeto Indicadores Agroambientais (AEI) como consequência das recomendações das instituições de pesquisa em agricultura e meio-ambiente e dos governos regional e nacional. A comunidade científica e membros do governo determinaram seis indicadores: riscos de degradação do solo, manejo dos recursos das fazendas, riscos de contaminação da água, balanço dos gases causadores do efeito estufa, mudança na biodiversidade e eficiência de uso dos insumos. Cada indicador possui, o que eles definiram de componentes, o que na verdade são atributos do solo, da água e do meio-ambiente. Estes componentes são classificados conforme o grau de influência no indicador correspondente. O objetivo do projeto AEI foi formar um banco de dados para auxiliar na identificação de áreas e recursos com riscos de degradação e na elaboração de estratégias de remediação (Huffman et al., 1998).

Droogers e Bouma (1997) e Bouma e Droogers (1998) aplicaram um modelo de simulação que explora as relações entre produtividade das culturas e lixiviação de nitrato, a fim de determinar indicadores de qualidade de terra na Holanda. Este indicador considera os riscos implicados na produtividade em função de poluentes, como o nitrato. Os sistemas de produção sem agroquímicos obtiveram índices maiores que os sistemas com agroquímicos.

Na China, Wang e Gong (1998) desenvolveram um “software” para avaliar alterações na QS no tempo. O método consistiu na digitalização de mapas de relevo e um IQS, que foi obtido pela integração de atributos de solo medidos. Uma classificação atribui classes para intervalos de valores do IQS. Neste trabalho, os autores compararam áreas no início e após 11 anos de uso, com a finalidade de analisar efeitos na QS das práticas de manejo empregadas. O uso com pastagens recebeu o melhor IQS comparado a florestas, citros e culturas hortícolas.

Uma linha paralela à avaliação da qualidade do solo por indicadores é a avaliação da sustentabilidade das terras. Da mesma forma, pesquisadores buscam

indicadores, que devem seguir critérios similares aos propostos para os IQS (Zinck e Farshad, 1995).

Um procedimento para avaliação de manejo sustentável de terras foi desenvolvido pela Food and Agriculture Organization (FAO) e International Board for Research and Management (IBSRAM) (Smyth e Dumanski, 1995) como uma extensão da avaliação de terras da FAO. O procedimento chama-se “Framework for Evaluating Sustainable Land Management” (FESLM) e requer indicadores físicos, biológicos, econômicos e sociais. O procedimento consiste em cinco níveis: 1. análise dos indicadores, identificando causas, efeitos e restrições à sustentabilidade; 2. avaliação final, identificando grau de sustentabilidade ou probabilidade para atingi-la; 3. validação dos resultados; 4. avaliação constante (dentro dos três níveis anteriores) dos objetivos e das práticas de manejo do uso das terras, retroalimentando as avaliações; 5. implementação das propostas. Alguns testes do FESLM já foram feitos (Gameda e Dumanski, 1995) e indicam que características individuais dos produtores, em relação à tomada de decisão, são componentes importantes na sustentabilidade das terras. Gomez et al. (1996) avaliaram sustentabilidade de terras nas Filipinas seguindo os princípios do FESLM, enfatizando a facilidade e a simplicidade do método.

Em 1996, a Sociedade Americana de Ciência do Solo lançou uma publicação (Doran e Jones, 1996) onde vários cientistas propuseram métodos e procedimentos de análise para avaliação da QS. Independente do método, a maioria das propostas consideram vários atributos do solo, pois acreditam que não é possível inferir sobre a situação de determinado solo em relação aos pilares da QS (produção sustentável, qualidade ambiental e saúde humana e animal) com apenas um atributo. A integração de atributos permite avaliar o funcionamento do solo para determinado fim e, assim, inferir sobre sua qualidade. Esta mesma publicação, contempla estudos de caso em que foram

determinados IQS para algumas regiões dos Estados Unidos e uma região de vinhedos na Grécia.

Atualmente, a comunidade científica já se questiona sobre a utilização de um IQS, no sentido de que tendo um índice nas mãos, o que deve ser feito a partir de então. Doran e Zeiss (2000) afirmam que IQS são meramente “*um meio para atingir o fim*”, e este fim, segundo os autores, é o manejo sustentável dos sistemas agrícolas.

Liebig e Doran (1999) alertam que a escolha de determinados atributos pode ser adequada para locais específicos e a transferência desta escolha deve ser restrita a pontos geográficos similares em características físicas, químicas e biológicas do solo.

Sojka e Upchurch (1999) são enfaticamente contra aos IQS. Julgam que a simples indexação da diversidade das funções do solo é prematura para tomada de decisão (em relação ao manejo empregado) nas infinitas condições em que o solo se encontra. Acreditam que as práticas de manejo são mais impactantes sobre a habilidade do solo funcionar que as propriedades intrínsecas do solo. E, por isto, profissionais e cientistas do solo devem buscar “*qualidade do manejo do solo antes que o manejo da QS*”.

O que se observa é que os IQS nem sempre são acessíveis e fáceis de usar nas condições de campo e por diversas pessoas, como sugerem os critérios para obtenção dos mesmos. Pelos métodos propostos, a maioria das determinações exigem equipamentos sofisticados, disponíveis apenas em instituições de pesquisa. Mas, o grande mérito dos pensadores iniciais, os quais praticamente se enquadram nesta linha da busca pelo melhor indicador, está centrado em como eles conseguiram valorizar e atrair a atenção do meio científico e da sociedade em geral para QS. A condição cultural e o estilo de vida da sociedade no final do século XX colaboraram para que a preocupação com a QS recebesse uma valorização especial. Talvez por este motivo, hoje a comunidade científica como um todo se volta de uma forma ou de outra para QS

e para a influência desta na sustentabilidade agrícola. As linhas de pensamento seguintes são frutos deste pensamento inicial.

A segunda linha de pensamento em relação à QS, onde os pesquisadores consideram a matéria orgânica do solo (MOS) como o indicador ideal para avaliar QS, fundamenta-se nas várias funções e processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo estarem relacionados com a presença de matéria orgânica (Karlen et al., 1992; Carter e Stewart, 1996; Lal, 1997; Reeves, 1997; Herrick e Wander, 1998; Monreal et al., 1998; Seybold et al., 1998; Pulleman et al., 2000; Carter, 2001). Trabalhos vem sendo conduzidos para identificar qual componente da MOS melhor representa os critérios exigidos para constituir um IQS.

Gregorich et al. (1994) concluíram que as avaliações de C e N totais, C na fração leve e na matéria orgânica particulada (MOP), C e N mineralizáveis, C na biomassa microbiana, carboidratos e enzimas do solo constituem um conjunto de atributos, que pode ser utilizado para inferir sobre QS. Mas ressaltam que estas avaliações devem ser caracterizadas no tempo e no espaço e interpretadas considerando as características dos sistemas agrícolas estudados.

Elliot et al. (1994) identificaram que C mineralizado e C da MOP foram os indicadores de manejo mais sensíveis sobre a MOS, quando estudaram agroecossistemas no Cinturão do Milho (Corn Belt) e nas Planícies (Great Plains) dos Estados Unidos.

Com base na literatura, Blair et al. (1997) verificaram que o C lábil tanto declina como recupera mais rápido que o C não lábil ou C total, conduzindo à evidência que o C lábil é o indicador mais sensível que a dinâmica do C total do sistema. Em função disto, propuseram um índice que mede a quantidade de C lábil em relação ao C total, comparando um sistema testado com um sistema referência. Alertam que não há valores para este índice que podem ser considerados bons ou ruins. O índice fornece

uma medida da taxa de mudança do sistema estudado relativa a uma área comparativamente mais estável.

Bolinder et al. (1999) avaliaram C e N totais, C e N na fração leve, C e N na MOP, C na biomassa microbiana e C como carboidratos para comparar sistemas conservacionista (semeadura direta, rotação de culturas e adubações orgânicas) e convencional (revolvimento do solo, culturas contínuas) no leste Canadense. Eles concluíram que, para os solos estudados, C total, C e N na MOP e C na biomassa microbiana são os mais úteis e fáceis componentes da MOS que possam constituir um conjunto mínimo de dados para avaliar QS.

Acima da busca pela fração da MOS que melhor representa um IQS, atualmente a grande discussão da ciência do solo, que relaciona QS e MOS, é quanto à capacidade dos solos em seqüestrar CO₂ da atmosfera (Lal et al., 1995; Carter e Stewart, 1996; Lal, 1997; Lal et al., 1998a; Reicosky e Forcella, 1998; Soil and Tillage Research, 1998; Corazza et al., 1999; Bayer et al., 2000a; Bayer et al., 2000b; Amado et al., 2001).

O aumento na concentração de CO₂ atmosférico no último século, mais precisamente depois da revolução industrial foi de 25%, correspondendo a uma taxa de 0,5% ao ano (Duxbury et al., 1993). Este fato é devido, principalmente, a duas atividades antropogênicas: queima de combustíveis fósseis e alterações no uso das terras (Lal et al., 1998b). As atividades agrícolas contribuem com um quarto do efeito total (Lal, 1997). Desta fração, dois terços são relacionados com práticas agrícolas e um terço está associado à conversão das terras para uso agrícola (Duxbury et al., 1993).

A quantidade de C no solo representa duas vezes a quantidade de C na atmosfera (Lal et al., 1998b). Práticas de manejo que favorecem a oxidação da MOS pelos microrganismos e a conseqüente liberação de CO₂ pode elevar ainda mais a quantidade de C na atmosfera. Mas o processo também pode ser inverso, o solo pode contribuir para retirar CO₂ da atmosfera e retardar seu retorno, quando práticas de

manejo conservacionistas são utilizadas. Estas práticas, como semeadura direta e rotação de culturas, conduzem ao aumento da MOS, garantindo a QS e contribuindo para diminuir a emissão de CO₂ do solo para atmosfera (Bayer et al., 2000b).

A terceira linha de pensamento em relação à QS, a qual analisa os processos que ocorrem no sistema solo-planta, é direcionada por Addiscott (1995). Este autor considera o solo, termodinamicamente, um sistema aberto, e como tal tende para um estado estável, caracterizado pela mínima produção de entropia. O princípio da Mínima Produção de Entropia diz que a realização de trabalho termodinâmico contínuo no sistema solo-planta, a partir da energia solar, conduz à auto-organização deste sistema. Em adição aos processos de ordenação, há também processos dissipativos, que produzem entropia, dissipando energia calorífica ao acaso. Por este princípio, QS depende da manutenção de um balanço adequado entre ordem e dissipação dos processos físicos, químicos e biológicos, que ocorrem no sistema solo-planta.

Na teoria de Addiscott (1995), a fotossíntese e seus processos associados referem-se à ordenação, pois a partir de moléculas pequenas, como CO₂, NH₃ e H₂O, formam estruturas de grande peso molecular, complexas e ordenadas, diminuindo a entropia do sistema. No sentido contrário, estão a respiração e a decomposição de plantas, processos dissipativos, que a partir de estruturas ordenadas, com grande peso molecular, produzem pequenas moléculas tais como CO₂, CH₄, N₂O e NO₃⁻, todas indesejáveis ambientalmente, quando em excesso. Esta análise propõe a busca de sistemas agrícolas que permitam o estabelecimento do estado estável, onde a produção de entropia é mínima. A avaliação da QS deve ser feita pela determinação da quantidade de pequenas moléculas existentes no sistema solo-planta, como CO₂, CH₄, N₂, NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄²⁻.

Coleman et al. (1998), baseados em Adiscott (1995), afirmaram que a chave para a avaliação da QS é a medição de processos essenciais que ocorrem no mesmo, e

desta forma o estado de qualidade de um dado solo é determinado. Neste sentido, propuseram a relação fotossíntese/respiração (F/R) para avaliar QS. A relação F/R determina a produção líquida de carbono no sistema solo-planta, medido pela quantidade de carbono fixado e a quantidade de carbono respirado num determinado período de tempo. A relação indica o balanço entre ordem e dissipação de um sistema: quando a relação F/R é maior que 1, o sistema solo-planta é considerado com qualidade; relação F/R igual a 1, o sistema está no seu estado estável; relação F/R, menor que 1, o sistema está em considerável perturbação.

Nesta terceira linha de pensamento entram os conceitos de resiliência e resistência do solo. Resiliência é a capacidade de um solo recuperar sua integridade funcional e estrutural após um distúrbio. E resistência é a capacidade do solo resistir a mudanças causadas por um distúrbio (Seybold et al., 1999), o que Lal (1993) define por estabilidade do solo, referindo-se, no sentido contrário, à suscetibilidade do solo a mudanças.

Resiliência está relacionada à QS em termos de recuperação das funções do solo (Seybold et al., 1999), já que um solo com qualidade tem propriedades autorreguladoras para manter seu estado atual (Coleman et al., 1998). E a relação de resiliência com sustentabilidade está baseada sobre a manutenção das funções do solo ou QS no tempo (Seybold et al., 1999).

Para Addiscott (1994) se um solo no seu estado estável é perturbado, gera um aumento na produção de entropia. Seus mecanismos de regulação irão agir para contrapor a perturbação e restaurar o estado estável, conduzindo a produção de entropia para um mínimo. Portanto, a resiliência depende de um balanço entre os processos de degradação e de restauração do solo (Lal, 1994).

O pensamento de balanço entre processos essenciais no solo não é novo. A área de pedogênese é fundamentada na termodinâmica clássica (Smeck et al, 1983), e

Nikiforoff (1959), por exemplo, afirmou que processos exergônicos no solo devem ser balanceados por processos endergônicos, os quais recuperam a energia livre do sistema. Segundo o autor, no sistema solo-planta, processo endergônico é o acúmulo de carbono orgânico e processo exergônico é a oxidação do mesmo. A taxa de entrada de energia livre no sistema, através da atividade endergônica determina a quantidade possível da performance exergônica para que o sistema não altere seu estado atual, conduzindo à idéia de capacidade suporte, resiliência do solo.

Analisando as três linhas de pensamento do meio científico em relação à QS, percebe-se que a pesquisa se volta na identificação de atributos, fórmulas ou procedimentos para avaliar QS adaptados para cada região, considerando as condições dos recursos naturais e as necessidades sócio-econômicas locais. Mas, além disso, percebe-se também que nas propostas de medição de atributos ideais está implícita a idéia de buscar determinações que representem a interação de todos os componentes do sistema agrícola, com a finalidade destas refletirem o adequado funcionamento do solo como um todo, que é a própria QS, como fica mais explícito na terceira linha de pensamento.

Neste trabalho, entende-se que o ponto chave é o solo ser considerado como um sistema aberto, conforme a teoria de Addiscott (1995), e a QS enfocada como sustentabilidade do sistema solo-planta. O solo por si só não atinge qualidade, mas sim o sistema solo-planta e, naturalmente, o sistema microrganismos integrados. Associando à idéia de Doran (1997), de que a QS é resultado do funcionamento adequado do solo, somente integrado às plantas e aos microrganismos, o solo é capaz de funcionar e, assim, atingir qualidade. Para avaliação, a auditoria de pequenas moléculas (Addiscott,1995) seria uma alternativa, mas a medição de processos essenciais (Coleman et al., 1998) que ocorrem no sistema solo-planta parece refletir melhor o comportamento do solo quanto à sua qualidade.

Portanto, julga-se que a simples medição de atributos não contribui para atingir QS. É mais importante identificar como obtê-la, do que identificar atributos para medi-la. Em função disto, primeiramente procurou-se compreender o funcionamento do solo, com a expectativa de construir subsídios para a tomada de decisão que conduzem à QS, sendo necessário, então, estudar a termodinâmica do não-equilíbrio, pois é o ramo da ciência que trata do funcionamento de sistemas abertos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Noções da Termodinâmica do Não-Equilíbrio

As noções da termodinâmica do não-equilíbrio deste trabalho referem-se à interpretação feita nas obras bibliográficas de Prigogine e Stengers (1992), Prigogine (1996) e Prigogine e Stengers (1997). Portanto, não será citada a referência de cada afirmação.

Sistemas abertos recebem um fluxo contínuo de energia e matéria e, por isto, funcionam afastados do equilíbrio. O equilíbrio termodinâmico é um estado característico de sistemas fechados, no qual o sistema, após ter recebido uma quantidade de energia e matéria, não sofre mais alterações. Como os sistemas abertos recebem continuamente um fluxo de energia e matéria, o equilíbrio nunca é atingido.

A situação de não-equilíbrio nos sistemas abertos se caracteriza por apresentar a variação de entropia (dS) sempre positiva. A entropia é a energia dissipada por um sistema durante a realização de um processo. A variação de entropia é dada pela soma de dois termos: um termo deS , referente às trocas, aos fluxos entre o sistema e o ambiente externo a ele, podendo ser positiva ou negativa; e o outro termo é d_iS , que descreve a entropia produzida no interior do sistema. O segundo princípio da termodinâmica afirma que seja quais forem as condições nos limites, a produção de entropia d_iS é positiva. No equilíbrio dos sistemas fechados a dS é zero, ou seja, o termo d_iS positivo é compensado pelo termo deS negativo. Mas em sistemas abertos,

onde existe um fluxo externo contínuo, o termo deS é sempre positivo, e, assim, a dS também é positiva. É esta energia que gera atividade aos sistemas.

A atividade de um sistema está diretamente relacionada com a energia imposta a ele, ou seja, ao fluxo que o sistema recebe. Quando um sistema recebe determinada energia, as partículas entram em colisões. O encontro entre duas partículas de velocidades v_1 e v_2 resulta em novas velocidades v_1' e v_2' . A princípio, uma colisão entre partículas parece reversível, se as velocidades forem invertidas, as partículas voltam ao mesmo lugar anterior à colisão. Mas a cada colisão ocorre o fenômeno de ressonância, e as partículas passam a interagir com o campo energético que se produz, criando correlações entre elas. A evolução de um sistema de colisão em colisão cria uma corrente de correlações, tornando impossível o retorno ao lugar anterior.

A atividade intrínseca do sistema aumenta sua sensibilidade. À medida que existe um fluxo, ocorrem flutuações no comportamento das partículas, em função da corrente de correlações, o que gera aumento na atividade intrínseca do sistema. Sendo assim, o sistema se torna mais sensível a si mesmo e às flutuações da sua própria atividade. Nesta situação, a entropia do sistema é alta e positiva e, mesmo assim, ele tem condições de se auto-organizar, pois no meio da corrente de correlações, quando o sistema está altamente ativo e sensível, podem emergir espontaneamente regimes estáveis de comportamento.

A auto-organização do sistema é possível porque os elementos que o compõem são interligados por múltiplos laços de realimentação, descritos por equações não-lineares. A configuração do sistema é uma rede de relações não-lineares, como demonstra a Figura 1. Nesta figura, os círculos representam os elementos que compõem o sistema, e as linhas dentro dos círculos, as relações dentro de cada elemento. Deste modo, os elementos são redes de relações embutidos em redes maiores. E é a partir

destas relações que os elementos estão interligados. Os limites de cada elemento não tem importância, enquanto que as relações são fundamentais.

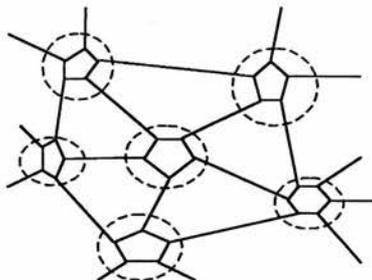


FIGURA 1. Configuração de um sistema aberto (Capra, 1996).

As relações entre os elementos possuem um vínculo de causa. Por exemplo, quando uma mensagem inicial é recebida por um dos elementos do sistema, provoca a propagação de um sinal através das relações não-lineares, de modo que cada elemento tenha efeito sobre o seguinte, e o sistema se auto-organiza em função da mensagem recebida. Então, em função do fluxo, que gera correlações entre as partículas, o sistema se auto-organiza num estado de ordem.

Se o fluxo que está passando no sistema é constante, as quantidades de energia e matéria não se alteram, e o sistema se auto-organiza num estado de ordem, que permanece estável enquanto durar esta constância do fluxo. Mas o fluxo pode alterar, e a ordem em que o sistema se encontra sofre transformações constantes em função deste fluxo e da conseqüente corrente de correlações, aumentando a sua sensibilidade, até que chega um momento onde a ordem atual se instabiliza. A sensibilidade do sistema está diretamente relacionada com sua instabilidade. Quando o sistema está altamente ativo e sensível, ocorrem condições para o surgimento espontâneo de outros comportamentos estáveis. E estes permanecem estáveis dependendo da manutenção do fluxo atual,

qualquer alteração pode conduzir o sistema para outros novos estados de comportamento.

Os momentos em que o sistema deixa de ser estável para se tornar instável são definidos como pontos de bifurcação. Nos pontos de bifurcação, o comportamento do sistema se torna instável e pode evoluir na direção de vários estados estáveis, que surgem em diferentes níveis de ordem. A análise da Figura 2 facilita o entendimento deste processo. No eixo y está o nível de ordem, que significa que a ordem do sistema aumenta no sentido do eixo. E no eixo x, a distância do equilíbrio, a qual aumenta também no sentido do eixo, em função do andamento do fluxo de energia e matéria. A linha contínua representa os estados estáveis, e a linha tracejada representa os estados de instabilidade. Observa-se, inicialmente, que o sistema se encontra num estado estável, e à medida que se afasta do equilíbrio, em função do andamento do fluxo de energia e matéria, surge um ponto onde o estado estável se torna instável. Neste ponto, novos estados mais estáveis emergem em outros níveis de ordem. Quanto mais distante do equilíbrio, mais instável o sistema se torna, mais dependente do fluxo atual. Qualquer alteração no fluxo pode conduzi-lo para outro estado, em um nível de ordem diferente.

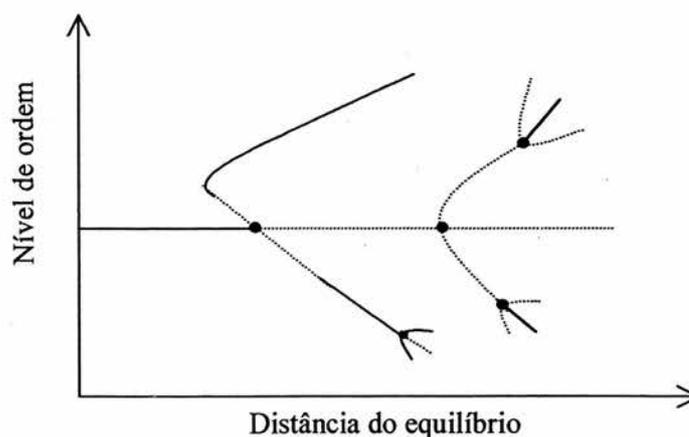


FIGURA 2. Diagrama de bifurcações de um sistema em condição de não-equilíbrio (adaptada de Prigogine e Stengers, 1997).

Portanto, a partir de uma certa distância do equilíbrio, onde aumenta a sensibilidade do sistema, várias possibilidades são abertas. Este sistema irá modificar-se para um novo estado de ordem, dependendo da natureza da flutuação que instabilizou o sistema. O fluxo de energia e matéria que passa nos sistemas provoca alteração na quantidade de energia e matéria retida pelo mesmo. O fluxo vai influenciar a concentração da energia e matéria no tempo, mas estas são função da diferença entre quantidade adicionada e perdida. O novo estado de ordem pode ser característico de desenvolvimento ou de decomposição.

A alteração do fluxo produz desenvolvimento, quando a quantidade de energia e matéria que passa pelo sistema aumenta, e, através das relações não-lineares, emergem espontaneamente novas estruturas e formas de comportamento, conduzindo o sistema para um novo estado de ordem mais alto com maior quantidade de energia e matéria retida. O andamento do fluxo resulta no surgimento de estados de ordem em níveis sucessivamente mais elevados, que se caracterizam pela diversidade crescente e pela riqueza das relações, da estrutura e do comportamento. O sistema tende à uma complexidade crescente, ou seja, ao desenvolvimento.

Por outro lado, a alteração do fluxo pode gerar decomposição, quando a quantidade de energia e matéria que passa pelo sistema diminui e, através das relações não-lineares, um novo estado de ordem emerge, mas com nível de ordem inferior ao estado precedente. Este estado de ordem é caracterizado por uma simplicidade maior dos elementos e da estrutura com menor quantidade de energia e matéria retida. Com o passar do tempo, a diversidade e a complexidade das relações e da estrutura diminuem. O sistema tende à decomposição.

A flecha do tempo está associada à evolução dos sistemas. Isto se deve ao caráter irreversível das colisões entre as partículas, causado pelo andamento do fluxo de energia e matéria. Mesmo invertendo, teoricamente, a velocidade das partículas é

impossível voltar ao estado inicial, devido à criação de ressonâncias e à corrente de correlações.

Entende-se melhor a flecha do tempo, observando o comportamento de um sistema fechado que atinge o equilíbrio frente a uma simulação numérica (Figura 3). A experiência permite visualizar o comportamento da função H em relação ao tempo. A função H foi construída por Boltzmann para relacionar a distribuição das velocidades das partículas. A simulação calcula as velocidades referentes ao movimento de um conjunto de “discos rígidos” sobre uma superfície de duas dimensões, ou seja, um sistema fechado que evolui para o equilíbrio. No instante inicial, a distribuição das velocidades é aleatória, mas corresponde a uma situação distante do equilíbrio. A função H decresce para um valor constante, que caracteriza o estado de equilíbrio do sistema. No equilíbrio, as colisões não modificam a distribuição das velocidades, exceto algumas flutuações. Se as velocidades das partículas são invertidas depois de cinquenta colisões, pode-se verificar que o valor da função H aumenta em vez de diminuir e atinge o valor inicial. Mas a inversão das velocidades tem um efeito transitório, pois passado algum tempo a função H volta a cair. Se a inversão das velocidades ocorrer não mais depois de cinquenta, mas depois de cem colisões, a função H não volta ao seu valor inicial, mas a um valor mais baixo. O que se conclui é que quanto mais numerosas tiverem sido as colisões antes da inversão das velocidades, mais difícil é “preparar” um sistema para subir o declive entrópico e retornar ao seu estado inicial, mesmo sendo um sistema fechado. Num sistema aberto é impossível retornar ao estado anterior, pois o fluxo de energia e matéria gera um grande número de ressonâncias e correlações entre as partículas, que afastam o valor das suas velocidades cada vez mais para longe do equilíbrio. Neste sentido, a flecha do tempo domina a evolução do sistema, a diferença entre passado e futuro é inevitável.

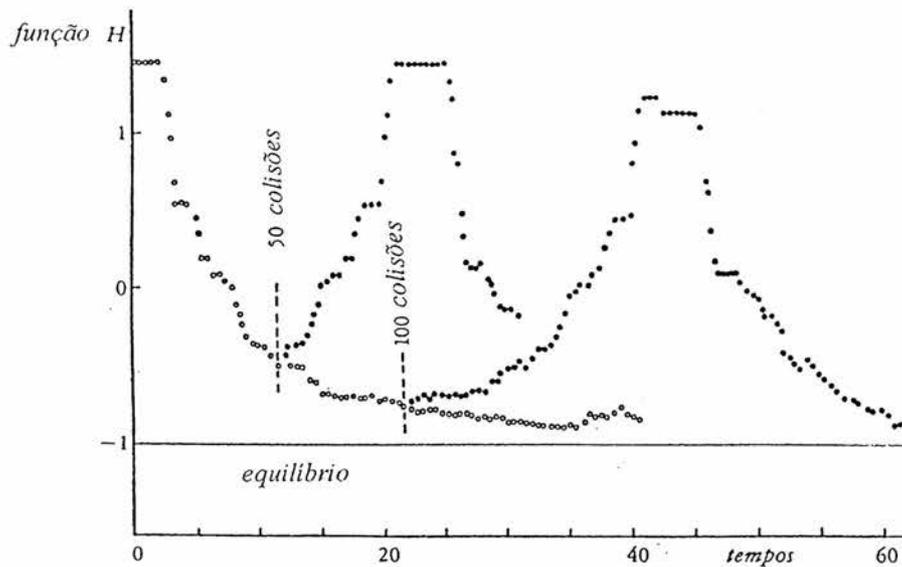


FIGURA 3. Simulação numérica da função H de um sistema que tende ao equilíbrio (Prigogine e Stengers, 1992).

Observando ainda a Figura 3, os sistemas que tendem ao equilíbrio independem das condições iniciais. Qualquer que seja a situação inicial, o sistema fechado atinge finalmente um estado determinado pelas suas condições aos limites, o equilíbrio, onde a função H tem o valor -1.

Nos sistemas que não atingem o equilíbrio, as condições iniciais não são esquecidas. A evolução ocorre a partir do estado de ordem em que o sistema se encontra e evolui conforme o fluxo de energia e matéria que passa por ele. As condições iniciais vão interferir na própria evolução do sistema, pois à medida que o mesmo se afasta do seu equilíbrio, em função do andamento do fluxo, ele se torna mais sensível, mais ativo, e é a partir do nível de ordem que o sistema se encontra que novas correlações irão ocorrer. O estado atual do sistema, a nova ordem emergente, depende do seu estado anterior, da sua história.

A Figura 4 representa a história de um sistema que não atinge o equilíbrio. O eixo y é o nível de ordem do sistema, e o eixo x , a distância do equilíbrio. As linhas descrevem os estados de ordem onde o sistema se encontra, em função da distância do

equilíbrio. Observa-se que o sistema no estado d2, por exemplo, atravessou os estados b1 e c1. O sistema só se encontra no estado d2 porque passou pelo b1 e c1, e no d2 estão incorporadas as propriedades dos estados anteriores. O estado atual do sistema vai ser sempre um registro do seu desenvolvimento anterior, vai depender da sua história. O caminho que o sistema percorre depende de como ocorreu a flutuação no sistema. Se o fluxo aumenta a quantidade de energia e matéria, o sistema caminha para o estado d1, em nível de ordem alto, com estrutura diversificada e complexa e grande quantidade de energia e matéria retida. Se o fluxo diminui a quantidade, o sistema caminha para o estado c4, em nível de ordem baixo, estrutura simplificada e pequena quantidade de energia e matéria retida.

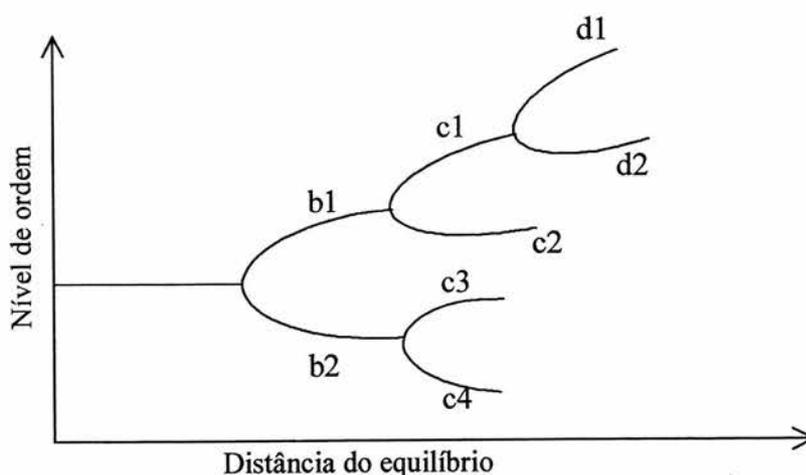


FIGURA 4. História de um sistema em condição de não-equilíbrio (adaptada de Progoine, 1996).

Nos diferentes níveis de ordem surgem as propriedades emergentes do sistema, que são a expressão das relações entre os elementos. À medida que aumenta o nível de ordem do sistema, aumentam as relações entre os elementos, pois o sistema fica mais complexo. Como as propriedades emergentes são a expressão destas relações, em nível de ordem alto as propriedades emergentes são em maior número, capacitando o sistema funcionar em múltiplas situações e, desta forma, manter a sua integridade frente a

perturbações. Quando o sistema tende a baixo nível de ordem, as relações diminuem e as propriedades emergentes são menos complexas, diminuindo a capacidade do sistema exercer funções diversificadas.

3.2. Caracterização do Sistema Solo

Com base na premissa de que o solo só é capaz de funcionar adequadamente e atingir qualidade através das relações que surgem da interação dos minerais, das plantas e dos microrganismos, o sistema solo, neste trabalho, é considerado ser a interação desses subsistemas. Em função disto, cada subsistema (mineral, plantas e microrganismos) será caracterizado individualmente e após será feita uma reflexão da interação entre eles com base nas noções da termodinâmica do não-equilíbrio, considerando fluxos e estados de ordem do sistema solo.

3.2.1. Subsistema Mineral

O subsistema mineral é o resultado de eventos, que agem sobre o material de origem e ocorrem simultaneamente ou em seqüência durante um longo período de tempo (Buol et al., 1973). Os eventos se caracterizam por influxos e efluxos de energia e matéria (Jenny, 1961), através de adições e perdas de material orgânico e mineral, translocações deste material de um ponto para outro, e transformações de minerais e substâncias orgânicas.

Neste contexto, o subsistema mineral está em constante modificação. O material de origem sofre alterações na sua composição química e mineralógica. Minerais primários se modificam a minerais secundários, que podem interagir e originar novos minerais. Em função da diversidade de condições iniciais e interações, que ocorrem durante o processo de formação do solo, as características e propriedades dos solos resultantes são muito distintas.

Nos solos de regiões subtropicais, área de interesse deste trabalho, a caulinita é o mineral predominante, podendo ocorrer, em alguns solos, mica, vermiculita, esmectita e hidróxi-alumínio entre camadas. Estes minerais, por serem dominantes na fração argila, são chamados de argilominerais. Óxidos de ferro e de alumínio e quartzo são minerais também importantes, que estão presentes nestes solos.

A caulinita é um mineral secundário da classe dos filossilicatos. Pode ser formada nos solos a partir de minerais primários ou secundários, que liberam alumínio e silício durante o processo de intemperismo. A sua estrutura consiste em lâminas tetraedral e octaedral unidas, compondo uma camada 1:1. A substituição isomórfica da caulinita é muito pequena, tanto na lâmina octaedral como na lâmina tetraedral. Em função disto, a carga permanente é muito baixa e, conseqüentemente, a capacidade de troca de cátions e a área superficial são pequenas (Schulze, 1989), esta pode variar entre 100 a 250 m² g⁻¹ (Schwertmann e Herbillon, 1992). A maior quantidade de carga da caulinita é originada nas extremidades laterais, onde os grupos OH são coordenados com os cátions Al³⁺ e Si⁴⁺ nas lâminas octaedral e tetraedral, respectivamente, conhecidos como grupos aluminol e silanol (Cornejo e Hermosín, 1996). Estes grupos funcionais possuem a capacidade de associar ou dissociar H⁺. Portanto, a carga resultante da caulinita é pH dependente, ou seja, a caulinita pode apresentar carga positiva ou negativa conforme a concentração de H⁺ no meio (Schulze, 1989). O ponto onde a soma das cargas positivas e negativas da caulinita é zero (PCZ) situa-se numa faixa de pH entre 3,3 e 4,9 (Raij, 1986).

A mica é um mineral primário da classe dos filossilicatos. A sua estrutura consiste de uma lâmina octaedral situada entre duas lâminas tetraedrais, compondo uma camada 2:1. Na camada tetraedral ocorre substituição isomórfica, na qual 25% das posições do Si⁴⁺ são ocupadas por Al³⁺. A carga líquida negativa resultante desta substituição é compensada, em parte, pelo íon K⁺, que é fortemente atraído entre as

camadas, conferindo ao mineral o caráter não expansivo. A área superficial específica das micas é de 70 a 120 m² g⁻¹, restrita às superfícies externas. A capacidade de troca de cátions é de 20 a 40 cmol_c kg⁻¹ (Fanning et al., 1989). Nas extremidades do mineral podem ocorrer cargas dependentes do pH, da mesma forma que a caulinita.

Vermiculita e esmectita são minerais secundários, originados da mica quando ocorre a saída do K⁺ e entrada de outros cátions solvatados. Possuem camada 2:1 e são expansivos. O excesso de cargas negativas na lâmina tetraedral, devido à substituição isomórfica, somado ao caráter expansivo, confere a estes minerais uma elevada capacidade de troca de cátions. Vermiculita alcança 100 a 200 cmol_c kg⁻¹ em virtude da grande área superficial específica de 750 m² g⁻¹ (Douglas, 1989). A esmectita possui uma capacidade de troca de cátions em torno de 80 a 120 cmol_c kg⁻¹ e área superficial específica de 800 m² g⁻¹ (Borchardt, 1989). Cargas dependentes do pH podem ocorrer nas extremidades destes minerais.

Em solos mais intemperizados, policátions de alumínio (Al_n(OH)_n) de carga positiva se atraem às cargas negativas da vermiculita e esmectita, formando os hidróxi-alumínio entre camadas. Estes minerais são altamente estáveis e não permitem a expansão do mineral 2:1. Como ocupam o espaço entre camadas e neutralizam o excesso de cargas negativas, diminuem a capacidade de troca de cátions dos minerais 2:1 (Barnhisel e Bertsch, 1989).

Os óxidos de ferro têm como unidade estrutural básica um octaedro, no qual cada átomo de ferro é cercado por seis oxigênios e/ou hidroxilas. Na superfície deste mineral, os grupos funcionais OH ligados ao Fe também possuem a capacidade de associar e dissociar H⁺, resultando em carga de superfície dependente do pH. Cristais deste óxido no solo possuem tamanhos que variam de 5 a 150 nm, e área superficial específica em torno de 70 a 170 m² g⁻¹ (Kämpf, 1999). Essas características fazem com

que os óxidos de ferro sejam altamente reativos no solo. O PCZ está numa faixa de pH entre 7 a 9 (Schwertmann e Taylor, 1989).

Os óxidos de alumínio têm uma estrutura composta por dois planos de OH com Al^{3+} entre eles. A parte reativa dos óxidos de alumínio é a extremidade Al-OH, que associa ou dissocia H^+ conforme o pH, sendo o PCZ na faixa de pH entre 8 e 9 (Hsu, 1989).

A estrutura do mineral quartzo se constitui de tetraedros de sílica (SiO_4). É um dos minerais mais puros na natureza, e as raras substituições isomórficas do silício geram uma deficiência de carga, que é compensada pela entrada de íons intersticiais (Drees et al., 1989). Em função disto, o quartzo é considerado um mineral eletricamente neutro.

Portanto, a parte mineral de um solo de ambiente subtropical é constituído, de forma geral, por quartzo, caulinita, óxidos de ferro e de alumínio. A fração argila é composta, principalmente, por caulinita e óxidos de ferro e de alumínio, e as frações tamanho silte e areia, por quartzo. Como nesses solos o pH está numa faixa de 4,5 a 6,5, a carga elétrica de superfície predominante da caulinita é negativa e dos óxidos, a carga é positiva.

3.2.2. Subsistema Plantas

O subsistema plantas se caracteriza por ser a fonte geradora de energia e matéria do sistema solo. As plantas, através da sua fisiologia, transformam energia luminosa em energia química, e introduzem no sistema solo a energia e a matéria necessárias para o seu funcionamento. Pelo processo de fotossíntese, captam energia solar e CO_2 atmosférico, além de sais e água do solo para produção dos tecidos da parte aérea e das raízes e dos exsudatos. E, desta forma, é o elemento do sistema solo que capta para dentro do mesmo a maior porção de energia e matéria do ambiente externo.

A fixação de CO_2 através da luz ocorre em duas etapas (Figura 5). A primeira é a produção de compostos ricos em energia, e a segunda é a fixação propriamente dita de CO_2 e sua transformação em carboidratos. A fotossíntese ocorre nos cloroplastos das plantas, onde estão localizados os pigmentos e as enzimas necessárias para as reações de captação de luz e de fixação de CO_2 (Nelson e Cox, 2000).

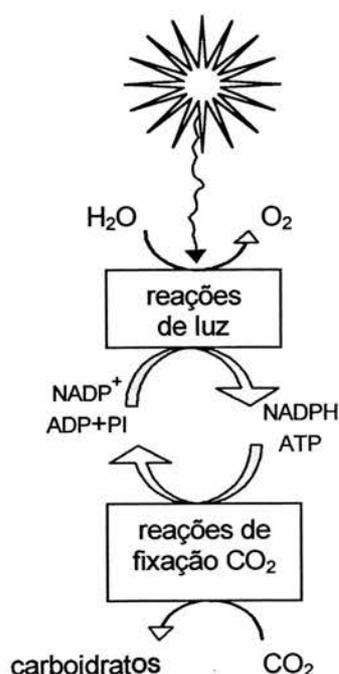


FIGURA 5. Reações da fotossíntese nas plantas (Nelson e Cox, 2000).

Os pigmentos são responsáveis por absorver fótons de luz e convertê-los em energia química, que é utilizada para formar o primeiro composto rico em energia da fotossíntese, o NADPH. Neste processo, é essencial a presença de água, pois é da quebra desta molécula que elétrons são liberados e geram a energia necessária para produção de NADPH (Salisbury e Ross, 1994; Nelson e Cox, 2000).

O outro produto da fotossíntese rico em energia é o ATP, formado pela fosforilação de ADP. Este processo ocorre ligado à conversão de energia luminosa em energia química, que provoca um gradiente na concentração de H^+ entre

compartimentos do cloroplasto, induzindo a atuação da enzima responsável pela união de ADP e fósforo inorgânico (Salisbury e Ross, 1994; Nelson e Cox, 2000).

NADPH e ATP produzidos pelas reações de luz fornecem a energia necessária para as plantas realizarem a segunda fase da fotossíntese, que é a fixação de CO₂ atmosférico e a síntese de glicose, sacarose e outros carboidratos (Figura 5). Além do CO₂ atmosférico e água, esta etapa necessita de fósforo inorgânico, que é fornecido pelo sistema solo (Salisbury e Ross, 1994; Nelson e Cox, 2000).

O produto final da fixação de CO₂ pode ser estocado como amido, usado imediatamente como fonte de energia ou convertido à sacarose. A sacarose entra nas rotas anabólicas das plantas e juntamente com água e nutrientes provenientes do solo, formam polissacarídeos e geram os constituintes do tecido vegetal (Salisbury e Ross, 1994; Nelson e Cox, 2000).

De modo geral, o tecido vegetal é constituído na maior parte por celulose, hemicelulose e lignina, e, em menor proporção, por compostos solúveis em água (açúcares simples, aminoácidos, ácidos alifáticos), compostos solúveis em éter (graxas, óleos, resinas, pigmentos), proteínas e minerais. Conforme a planta envelhece, o conteúdo dos compostos solúveis em água, proteínas e minerais diminui e, proporcionalmente, aumenta a quantidade de celulose, hemicelulose e lignina (Alexander, 1980).

A celulose é o maior constituinte dos tecidos vegetais. A sua estrutura consiste numa cadeia linear de glicose, localizada na parede celular, organizada de tal forma que há um espaço entre as moléculas, onde se deposita lignina no tecido das plantas maduras (Alexander, 1980).

A hemicelulose é o segundo constituinte do tecido vegetal em quantidade, e se encontra em íntima associação física com a celulose na parede celular das plantas. A sua

estrutura é a união de açúcares simples e ácidos urônicos, geralmente em cadeia ramificada (Alexander, 1980).

A lignina é o terceiro constituinte mais abundante dos tecidos vegetais. O conteúdo é baixo nos vegetais novos, mas aumenta conforme a idade da planta. Está associada à celulose na parede celular. A estrutura química é um polímero aromático, altamente ramificado. As unidades básicas possuem diferentes tipos de ligações entre si, as quais são muito fortes. Além disto, os diferentes tipos de ligações não se repetem a intervalos regulares (Alexander, 1980).

Os demais polissacarídeos estão em menor proporção no tecido vegetal das plantas. O amido é um polímero de glicose com cadeia linear ou ramificada, e se constitui num produto de reserva das plantas, em maior concentração nas folhas. A insulina é outro polissacarídeo de reserva, composta por unidades de frutose. As substâncias pécicas constituem menos de 1% da matéria seca das plantas, e estão localizadas nas lamelas médias. São polissacarídeos complexos, compostos por ácido galacturônico, e sua importância está na função de manter as células unidas (Alexander, 1980).

A função do subsistema plantas em fornecer energia e matéria para o sistema solo se dá pela contribuição da parte aérea e das raízes. A contribuição da parte aérea ocorre no final do ciclo vegetativo da cultura. A planta, após a morte, é deixada sobre o solo e, a partir deste momento, inicia o processo de decomposição microbiana, que será detalhado no item 3.2.4. Fluxo de Energia e Matéria no Sistema Solo.

A contribuição das raízes é contínua durante o ciclo vegetativo da planta, pois está em constante crescimento, a fim de aumentar a área de captação de água e de nutrientes e sustentar fisicamente a parte aérea. Desta forma, as raízes abrangem grande área física do sistema solo, distribuindo eficientemente material orgânico dentro do mesmo. Enquanto a planta está viva, mais de 300 g kg⁻¹ dos fotossintatos atingem o solo na forma de exsudatos solúveis, mucilagens, pêlos radiculares e sistema radicular

(Oades, 1989; Paul e Clark, 1996). A contribuição do carbono derivado do tecido e dos exsudatos das raízes para a matéria orgânica do sistema solo pode exceder à contribuição da parte aérea (Balesdent e Balabane, 1996). Este fato está baseado na menor taxa de decomposição das raízes, em função do maior teor de lignina nos tecidos radiculares, e na introdução direta dos produtos derivados da raiz na matriz do solo. Entre 16 a 33% do carbono total assimilado pelas plantas é liberado diretamente dentro do solo pelas raízes, contribuindo com 30 a 60% da matéria orgânica do solo (Sanchez et al., 1989; Heal et al., 1997). A presença de microrganismos na rizosfera induz a produção de exsudatos pelas plantas.

A quantidade de matéria vegetal produzida pelo subsistema plantas depende da disponibilidade de nutrientes, de água e de ar no solo, da radiação solar, da temperatura atmosférica, das características fenológicas e das condições físicas do solo para o crescimento adequado das raízes.

3.2.3. Subsistema Microrganismos

O subsistema microrganismos é o responsável em transformar a energia e a matéria geradas no subsistema plantas em forma adequada para o funcionamento do sistema solo. Este subsistema engloba bactérias, fungos, actinomicetos, algas e protozoários. Como todo ser vivo, eles requerem suprimento de nutrientes e de energia em quantidade e em estado apropriados (Neves, 1992).

Existem quatro grupos de microrganismos quanto ao tipo de nutrição (Neves, 1992). Os autotróficos obtêm todo carbono para suas sínteses a partir do CO₂ e podem diferir quanto a fonte de energia: luz (fotoautotróficos) ou compostos inorgânicos (quimioautotróficos). Os heterotróficos utilizam compostos orgânicos como principal fonte de carbono, e podem obter energia da luz (fotoheterotróficos) ou dos próprios

compostos orgânicos (quimioheterotróficos). Os elétrons necessários para as sínteses dos microrganismos são provenientes de compostos orgânicos e inorgânicos.

A adequada atividade dos microrganismos depende de fatores abióticos como temperatura, pressão atmosférica, pressão hidrostática, pressão osmótica, salinidade, umidade, aeração (potencial redox), pH, força magnética e, naturalmente, radiação solar, compostos orgânicos e inorgânicos, que são fonte de energia e carbono (Tsai et al., 1992; Paul e Clark, 1996).

Portanto, os microrganismos utilizam uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos a fim de realizarem sua atividade e seu desenvolvimento. No sistema solo, eles obtêm energia e carbono principalmente pela decomposição da matéria vegetal produzida no sistema plantas ou da própria matéria orgânica do solo. Deste modo, os microrganismos convertem energia e matéria de uma forma para outra, realizando o movimento de energia e de matéria, o que caracteriza o fluxo no sistema solo.

3.2.4. Fluxo de Energia e Matéria no Sistema Solo

O fluxo de energia e matéria no sistema solo se constitui pela matéria vegetal adicionada, via subsistema plantas, e transformada pelos microrganismos à CO_2 . Durante este processo, existe a produção de uma seqüência de compostos orgânicos intermediários com tempo variável de permanência no solo, os quais servem como fonte de energia e carbono para a atividade microbiana. Neste sentido, os microrganismos realizam o fluxo de energia e matéria no sistema solo. Eles são os responsáveis pela formação de compostos orgânicos, subprodutos da sua atividade, e pela quebra de moléculas, liberando energia, geradora de outros tipos de compostos orgânicos. A quebra de moléculas, geralmente, é feita através de enzimas, que são liberadas pelos microrganismos para este fim.

A energia e a matéria entram nos subsistemas mineral e microrganismos através dos componentes do tecido vegetal, na forma de compostos solúveis em água, celulose, hemicelulose, lignina e substâncias péticas, e são transformadas pelos microrganismos.

A fração solúvel em água dos tecidos vegetais contém componentes de estrutura simples, sendo, portanto, os primeiros a serem utilizados pelos microrganismos.

Celulose e hemicelulose persistem mais (Alexander, 1980). Estes compostos não são utilizados diretamente pelos microrganismos como fonte de carbono e energia, precisam ser transformados a compostos de estrutura mais simples (Nelson e Cox, 2000). Esta transformação é realizada por um grupo de enzimas, que atuam em seqüência. O processo enzimático tem a função de baixar a energia de ativação da reação, que é a energia requerida para transformações intermediárias entre os componentes iniciais e os finais de uma reação (Nelson e Cox, 2000). Esta energia é obtida na interação altamente específica da enzima com o substrato. Neste complexo enzima-substrato, ocorrem múltiplas ligações fracas, como pontes de hidrogênio, interações hidrofóbicas iônicas e van der Waals. A formação de cada interação fraca no complexo enzima-substrato é acompanhada por uma pequena liberação de energia livre. Esta energia livre é utilizada para fornecer energia para a energia de ativação. Desta forma, a reação se processa, ocorrendo a quebra das ligações dos polímeros, transformando-os em monômeros ou oligômeros. Portanto, o rompimento do polímero ocorre com a energia de interações físico-químicas (Nelson e Cox, 2000). Durante o processo enzimático, os microrganismos não consomem energia nem substrato, ocorre apenas a transformação de uma molécula para outra, o que não possibilita síntese celular (Alexander, 1980).

Energia e carbono para síntese celular dos microrganismos são obtidos quando compostos de estrutura mais simples, produtos do processo enzimático como glicose, pentose, hexose e ácido urônico, são capazes de atravessar a permeabilidade da parede celular microbiana. Dentro da célula, estes compostos entram nas rotas metabólicas dos microrganismos, fornecendo carbono e produzindo energia para sua atividade e crescimento (Nelson e Cox, 2000).

A lignina possui alta resistência à degradação enzimática, devido à complexa estrutura da sua molécula. O processo de decomposição deste composto é mais lento que o da celulose e hemicelulose e, em função disto, à medida que a decomposição prossegue, aumenta a sua proporção nos resíduos. As enzimas responsáveis pela despolimerização da lignina são muito variadas, em função da diversidade da molécula, e os produtos do processo enzimático são formados lentamente. Como a molécula de lignina é um polímero de núcleos aromáticos, os produtos da despolimerização são substâncias aromáticas de baixo peso molecular (Alexander, 1980), que ainda necessitam ser transformadas por enzimas extracelulares a compostos mais simples, estes sim são capazes de penetrar nas células microbianas para fornecer energia e carbono.

Os demais polissacarídeos que compõem o tecido vegetal em menor proporção, seguem a mesma rota descrita acima. Ou seja, são transformados a açúcares simples pelas enzimas extracelulares. Os açúcares simples penetram na célula microbiana e entram nas rotas metabólicas para produção de energia, com liberação de CO_2 e H_2O . A glicose é a fonte de carbono preferida pela maioria dos microrganismos, mas eles também são muito versáteis e tem a habilidade de utilizar uma ampla classe de compostos de carbono e energia.

Em função da composição físico-química dos tecidos vegetais e da habilidade dos microrganismos do solo degradarem os mesmos, os resíduos de plantas mortas,

tanto da parte aérea como das raízes, são divididos, teoricamente, em compartimentos denominados estrutural e metabólico (Parton et al., 1987) com o propósito de melhor compreender suas características de transformação (Figura 6). A relação lignina/nitrogênio dos resíduos vegetais determina o compartimento, no qual os compostos se enquadram. Os compostos mais lignificados fazem parte do compartimento estrutural, os demais componentes, do metabólico. Diferem quanto ao tempo de degradação: o estrutural tem uma permanência que varia de 1 a 5 anos, enquanto o metabólico de 1 a 12 meses.

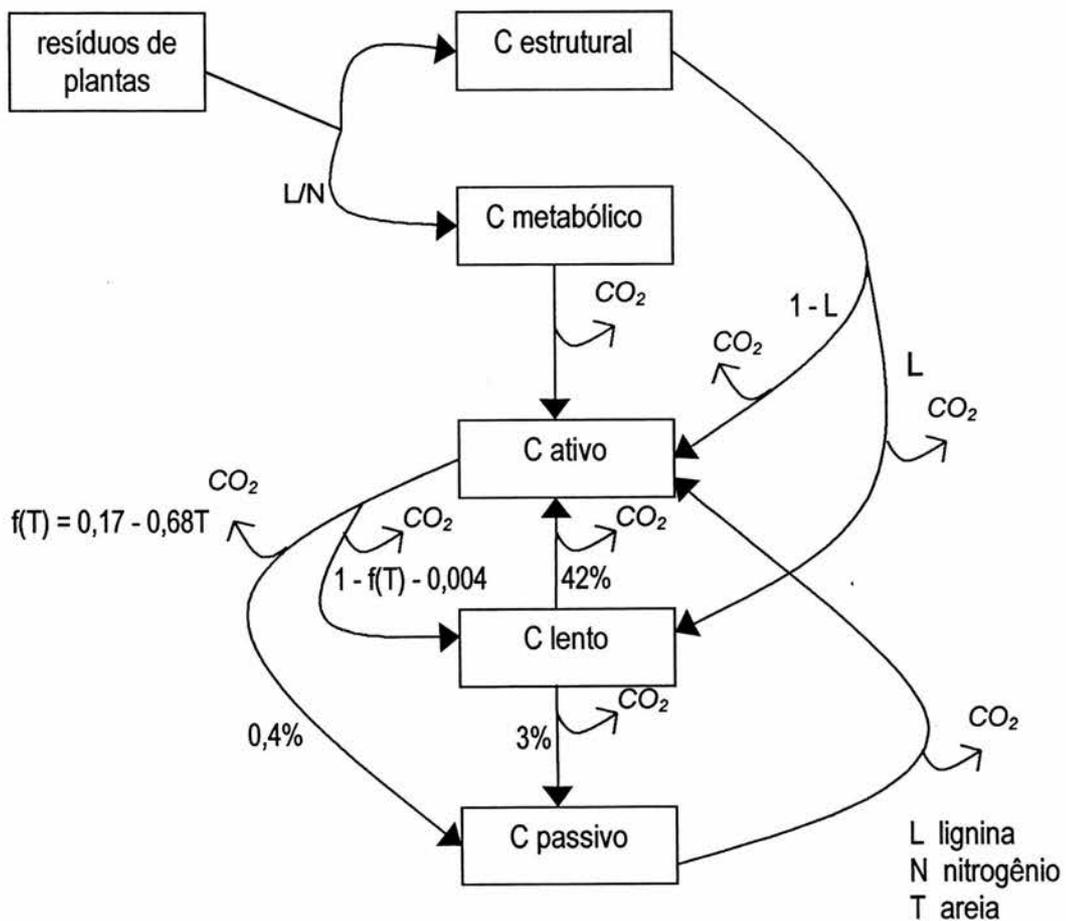


FIGURA 6. Diagrama do fluxo de carbono no modelo Century (adaptada de Parton et al., 1987).

Os resíduos vegetais, tanto da parte aérea como das raízes, nos seus variados estágios de decomposição, juntamente com a biomassa microbiana compõem uma fração da matéria orgânica do solo (Bayer e Mielniczuk, 1999). A matéria orgânica do solo consiste de um espectro de material, desde compostos lábeis, que mineralizam rapidamente, a compostos mais recalcitrantes, que acumulam como subprodutos microbianos (Piccolo, 1996).

A fração lábil consiste, principalmente, de resíduos de plantas nos estágios iniciais de decomposição e células microbianas (Piccolo, 1996). Apresenta alta taxa de decomposição e um curto período de permanência no solo (Bayer, 1996).

A fração mais recalcitrante representa dois terços da matéria orgânica do solo (Stevenson, 1994) e é composta de substâncias húmicas altamente polimerizadas, uma mistura de moléculas complexas de vários tamanhos e formas (Piccolo, 1996), produzidas através da ação microbiana sobre os resíduos vegetais. As substâncias húmicas diferem da fração lábil, devido à sua estrutura molecular e sua longa persistência no solo. A grande diferença das duas frações é a natureza biologicamente refratária das moléculas (Sposito, 1989). O processo bioquímico pelo qual as substâncias húmicas se formam ainda não está completamente entendido (Saiz-Jimenez, 1996).

As substâncias húmicas são divididas, quanto à solubilidade em ácido e em base, em humina, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos. Quanto à composição química destas frações, em termos gerais, os ácidos húmicos possuem mais carbono e menos hidrogênio e maior peso molecular que os ácidos fúlvicos (Oades, 1989; Sposito, 1989). A quantidade de grupos funcionais OH fenólicos é semelhante, mas os ácidos fúlvicos apresentam maior quantidade de grupos carboxílicos (Sposito, 1989).

Os grupos funcionais são responsáveis pela reatividade da matéria orgânica. Dentre os vários existentes, os carboxílicos e os OH fenólicos são os mais abundantes e significativos para a reatividade das moléculas (Sposito, 1989; Canellas et al., 1999). As

cargas elétricas de superfície são resultado da associação e dissociação de H^+ destes grupos funcionais (Oades, 1989) e dependem das condições do ambiente, tais como pH e força iônica da solução. A maioria dos grupos funcionais da matéria orgânica dissociam entre pH 5 e 7 (Sposito, 1989). A pH 3 inicia a dissociação de H^+ dos grupos COOH, gerando carga negativa de superfície, que aumenta com a elevação do pH, atingindo o máximo a pH em torno de 9, com a dissociação dos grupos OH fenólicos (Canellas et al., 1999). O PCZ da matéria orgânica do solo está em valores de pH ao redor de 3,5 (Sposito, 1989), portanto os sítios negativos da matéria orgânica aumentam com a diminuição da concentração de H^+ .

A matéria orgânica é a principal fonte de cargas negativas dos solos das regiões subtropicais, responsável em adsorver nutrientes para as plantas e outros compostos orgânicos e inorgânicos, como agroquímicos, presentes no meio.

A partir dos grupos reativos da matéria orgânica e dos grupos reativos dos minerais, que foram discutidos no subsistema mineral (item 3.2.1.), é que ocorrem as interações organo-minerais. Estas dependem da natureza intrínseca e das propriedades das espécies orgânicas, das propriedades dos minerais, principalmente do tipo de carga de superfície, do conteúdo de água e do pH do meio (Cornejo e Hermosín, 1996).

Cornejo e Hermosín (1996) propuseram alguns mecanismos de interação da matéria orgânica com os minerais do solo, considerando os grupos funcionais orgânicos e inorgânicos e aspectos termodinâmicos. Quando forças de entalpia estão envolvidas, os mecanismos podem ser:

1. forças de van der Waals: este mecanismo ocorre na formação de dipolos temporários, onde várias forças de atração muito fracas são produzidas. Estas forças são resultantes de pequenas perturbações de deslocamento eletrônico de átomos ou moléculas. Estão presentes em todas as interações, mas são particularmente importantes na adsorção de moléculas orgânicas

não iônicas ou não polares ao material húmico ou às associações húmus-mineral, por serem aditivas.

2. troca de cátions: mecanismo muito comum, principalmente entre cátions orgânicos (RNH_3^+) e cátions metais trocáveis, que competem pela superfície negativa saturada dos minerais. Neste mecanismo, o fenômeno de ação das massas exerce grande influência, além de ocorrer liberação de cátions para a solução.
3. protonação: muitas moléculas orgânicas se tornam catiônicas por protonação, após adsorção sobre a superfície dos minerais. A superfície mineral pode doar prótons para moléculas orgânicas através da troca de próton e dissociação da hidroxila da estrutura do mineral. A origem dos prótons reativos é da hidrólise da água de solvatação. Esta acidez aumenta em função do raio iônico dos cátions presentes no meio e com a diminuição do conteúdo de água, se tornando um mecanismo muito importante nos solos argilosos de pH baixo ou com baixo conteúdo de água.
4. troca de ânions: mecanismo similar à troca de cátions, onde um ânion trocável ligado à superfície mineral por uma hidroxila protonada é trocado por um grupo carboxilado.
5. pontes de água e cátions: a ponte de água é uma interação muito freqüente quando uma molécula orgânica polar ou aniônica é complexada com um cátion trocável via sua água de solvatação, formando complexo de esfera externa. Ponte de cátion se dá pela interação do grupo orgânico com o cátion através da substituição da sua água de solvatação, formando complexo de esfera interna.
6. pontes de hidrogênio: ligações fracas entre as moléculas orgânicas e a superfície dos minerais do tipo $-\text{OH}\cdots\text{N}$, $-\text{OH}\cdots\text{O}$, $-\text{NH}\cdots\text{O}$, $-\text{NH}\cdots\text{H}$.

7. troca ligante: este mecanismo envolve a substituição de um ou mais ligantes, que estão adsorvidos ao mineral por outras espécies adsorventes. Este tipo de força ligante acontece quando as espécies adsorventes são um agente complexante mais forte que o ligante substituído. Espécies orgânicas polares são facilmente ligadas pela troca ligante às superfícies dos óxidos e argilas, através de pontes de cátions, principalmente Fe ou Al, por possuírem energia de ligação mais forte que as espécies existentes nos sítios de troca do mineral.

Interações organo-minerais podem ocorrer também quando forças entrópicas estão envolvidas através de ligações hidrofóbicas. Este tipo de ligação é originada pelas interações fracas entre o soluto e o solvente, baixa solubilidade ou natureza hidrofóbica do soluto. O principal efeito da interação hidrofóbica parece ser a grande mudança de entropia, que resulta da remoção do soluto de dentro do solvente. A mudança de entropia é, principalmente, devido à destruição do espaço ocupado pela molécula orgânica na solução e eliminação das águas de solvatação dos cátions nos sítios de troca do mineral. Durante o processo, a entropia gerada fornece a força necessária para adsorção (Cornejo e Hermosín, 1996).

Em função das interações organo-minerais, a matéria orgânica do sistema solo pode ser dividida em três compartimentos (Parton et al., 1987). Esta separação não diz respeito à complexidade da estrutura orgânica, mas sim ao tempo de permanência da molécula no solo, o que está diretamente relacionada com a proteção física pela interação com os minerais e íons metálicos do solo, tanto ao nível coloidal como ao nível de agregados. Em solos com mineralogia composta por minerais com alta superfície reativa, como é o caso dos minerais de camada 2:1 e dos óxidos de ferro, as interações organo-minerais são favorecidas e a quantidade de matéria orgânica retida aumenta no sistema (Greenland et al., 1992). O efeito da proteção da matéria orgânica,

além dos processos de interação com os minerais, pode também estar relacionada com a maior proporção de poros menores que 0,001 mm, nos quais a matéria orgânica fica inacessível ao consumo microbiano (Greenland et al., 1992). Esta situação, geralmente, é mais pronunciada em solos com granulometria fina (Kay, 1998) e com presença de óxidos.

Os compartimentos da matéria orgânica do solo são definidos como ativo, lento e passivo, em função das diferentes taxas de mineralização à CO₂ (Parton et al., 1987). Os compartimentos se relacionam com as frações da matéria orgânica, que possuem diferentes níveis de estabilidade, influenciando no tempo de permanência no sistema (Andreux, 1996).

O compartimento ativo corresponde à biomassa microbiana e seus metabólitos, aos resíduos vegetais e aos exsudatos de plantas, com tempo de permanência até 5 anos. O compartimento lento engloba a fração da matéria orgânica fisicamente protegida pelas interações organo-minerais nos coloides e dentro dos agregados ou em formas químicas com maior resistência à decomposição microbiológica, permanecendo no solo por 20 a 40 anos. E o compartimento passivo é fisicamente protegido pelas interações organo-minerais, com tempo de permanência de 100 a 2000 anos (Parton et al., 1987).

A dinâmica da decomposição dos compartimentos do material vegetal (estrutural e metabólico, anteriormente definidos) e sua transferência para os compartimentos do solo (Figura 6) é regida, principalmente, pelo conteúdo de lignina. O material vegetal do compartimento metabólico e o material não lignificado do compartimento estrutural são transferidos para o compartimento ativo da matéria orgânica do solo, o qual contém a biomassa microbiana, que necessita de energia e carbono para sua atividade. O material vegetal lignificado do compartimento estrutural é transferido diretamente para o compartimento lento da matéria orgânica do solo. A matéria orgânica do compartimento lento é transferida para o compartimento passivo.

Este passo depende da textura do solo e das interações organo-minerais, que interferem no consumo pelos microrganismos e na conseqüente alteração das moléculas orgânicas. A permanência das moléculas orgânicas no compartimento lento é função da reatividade química das mesmas com os minerais do solo. A taxa de transferência dos compostos orgânicos dos compartimentos ativo e do lento para o passivo é de 0,4 e 3% ao ano, respectivamente (Parton et al., 1987). Em função das interações organo-minerais, a matéria orgânica do passivo se torna protegida fisicamente pelos minerais, ficando encapsulada dentro de microagregados. Nesta condição, as moléculas orgânicas estão inacessíveis à decomposição microbiana, podendo permanecer inalteradas por um longo período de tempo. Cada transferência de um compartimento para outro é acompanhada de liberação de CO₂, por ser produto da decomposição microbiana, e de pequenas moléculas tais como CH₄, N₂, N₂O, NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄²⁻, nutrientes minerais (Ca, Mg, K, P) e outros compostos orgânicos e inorgânicos (como os agroquímicos), que fazem parte da composição da matéria orgânica do solo ou estão adsorvidos nela. A quantidade de carbono que fica retida no sistema solo é resultado das relações entre os compartimentos.

Portanto, a entrada de energia e matéria no subsistema mineral se dá através da produção de matéria vegetal pelo subsistema plantas e a transformação desta pelo subsistema microrganismos. Os microrganismos utilizam a matéria vegetal para sua atividade e crescimento e, desta forma, convertem-na em outras formas de energia e matéria. A energia está associada neste processo, pois é responsável pela manutenção da estrutura dos compostos orgânicos e da biota do solo, que realiza as transformações. E assim, cria-se o fluxo de energia e matéria no sistema solo, onde ocorre a adição pela matéria vegetal e a saída pela mineralização da matéria orgânica do solo.

A adição de energia e matéria no sistema solo é influenciada pela quantidade de carbono produzida pelas plantas e pelos fatores abióticos, citados acima (item 3.2.3.

Subsistema Microrganismos), favoráveis à atividade dos microrganismos, que a transformam em matéria orgânica do solo. A saída de energia e matéria depende da possibilidade de consumo pelos microrganismos da matéria orgânica do solo, o que está relacionado com às interações organo-minerárias e à estrutura do sistema solo, a qual deve ter poros de tamanho compatível com o tamanho das células microbianas, além dos fatores abióticos favoráveis à atividade microbiana.

3.2.5. Estados de Ordem do Sistema Solo

A interação dos subsistemas mineral, plantas e microrganismos segue uma seqüência de fenômenos, que resultam na formação de estruturas com diferentes níveis de ordem, desde microestruturas até macroagregados. Esta seqüência de fenômenos é representada, de certa forma, pelo processo de agregação do solo.

A formação dos agregados do solo inicia numa escala de nanômetros (nm) e vai até milímetros (mm), onde estruturas maiores dependem da formação anterior de estruturas menores (Figura 7).

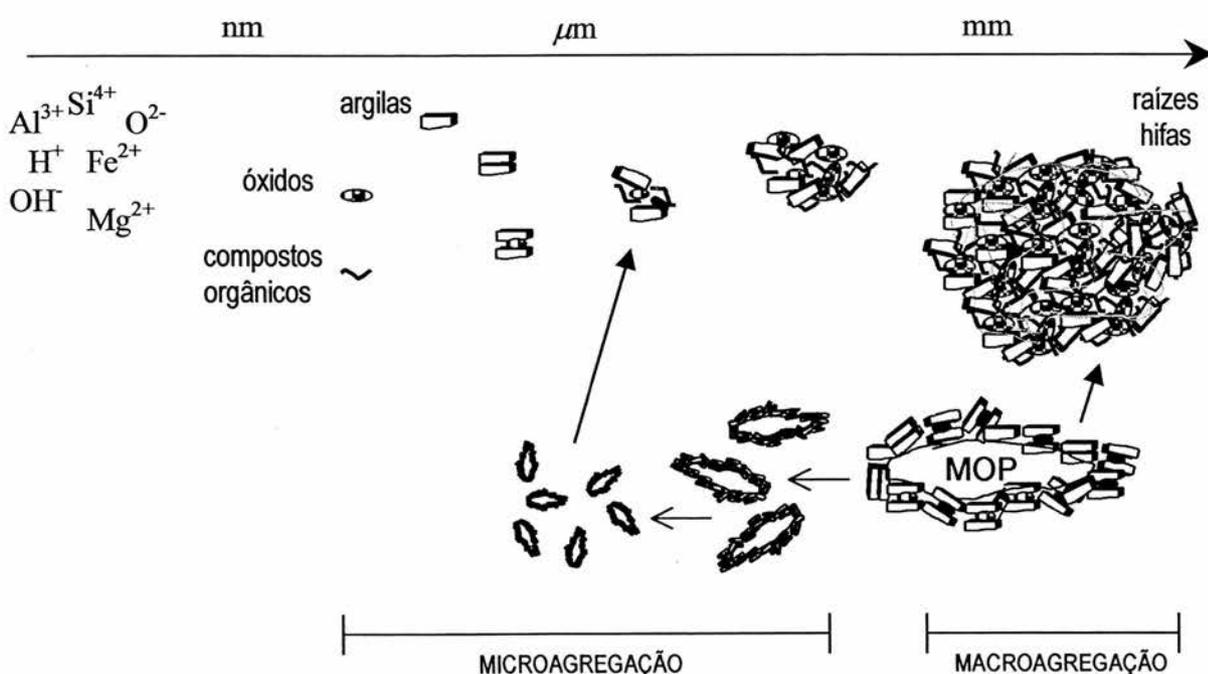


FIGURA 7. Representação do processo de agregação do sistema solo.

Ao nível de nanômetros, estão os elementos químicos liberados do material de origem pelo processo de intemperismo. Estes elementos se combinam, em função das condições de temperatura, pressão e umidade, para formar os minerais do solo: argilas de camada 2:1 e 1:1, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio e quartzo.

A ordenação do sistema solo inicia pela interação das partículas minerais. Em solução, as partículas individuais de argilas carregadas negativamente atraem cátions para balancear suas cargas. Estes cátions são provenientes do intemperismo do material de origem do solo ou liberado na decomposição do tecido vegetal. Os cátions possuem uma energia de hidratação, portanto estão sempre associados com moléculas de água, de forma que atraem o pólo negativo da água, deixando o pólo positivo na extremidade do complexo hidratado. Nesta orientação, os finais positivos das moléculas de água apontados em direção oposta aos cátions são atraídos pelas partículas de argilas carregadas negativamente. Quando tais partículas de argila se aproximam uma das outras ocorre repulsão entre elas, devido à parte externa positiva dos cátions hidratados. Estas forças de repulsão diminuem quando a aproximação entre as argilas é tal que forças de van der Waals se tornam efetivamente fortes. Neste ponto, as forças de atração entre as argilas dominam as forças de repulsão, ocorrendo a floculação e o início da formação dos agregados do solo. A floculação vai depender do tipo de cátion e da concentração eletrolítica da solução do solo. Cátions polivalentes e maior concentração eletrolítica favorecem a floculação, por diminuir a distância entre as partículas de argilas.

Neste nível de agregação, a entrada do subsistema plantas e do subsistema microrganismos interfere no processo, pois os compostos orgânicos resultantes desta interação influenciam as cargas de superfície dos minerais (Figura 7). De outra forma, os compostos orgânicos podem interagir com os cátions associados às superfícies das argilas, alterando a carga destes cátions, podendo aumentar ou diminuir a atração entre

as argilas (Harris et al., 1966; Tisdall e Oades, 1982; Muneer e Oades, 1989). As argilas são unidas por forças de van der Waals, pontes de H, pontes de cátions e atração coulombica (Tisdall, 1996).

Edwards e Bremner (1967) definiram esta classe de agregados como C-P-OM e $(C-P-OM)_x$, onde C é partícula de argila, P cátions polivalentes, OM compostos orgânicos, e x o número de repetição desta interação, que varia de 1 a 3.

Os cátions polivalentes são oriundos do intemperismo, da decomposição microbiana dos tecidos vegetais e da prática de adubação no sistema.

Os compostos orgânicos são provenientes da decomposição microbiana dos tecidos vegetais, dos exsudatos das plantas e dos microrganismos. Durante o processo de decomposição, compostos orgânicos são formados como produtos das reações, como foi visto anteriormente. Estes compostos são agentes ligantes das partículas minerais, através dos mecanismos de interações organo-minerais, descritos no item 3.2.4. Fluxo de Energia e Matéria no Sistema Solo.

Os exsudatos das plantas são liberados pelo sistema radicular, principalmente, durante o processo de absorção de nutrientes, a fim de balancear o desequilíbrio na neutralidade interna dos tecidos causado pela entrada de íons nas membranas radiculares. Mas, também, há exsudatos não relacionados com a absorção de nutrientes, resultantes de outros processos fisiológicos das plantas.

Os exsudatos dos microrganismos são mucilagens e gomas que os mesmos produzem para se proteger do meio ou até mesmo para se aderir às partículas sólidas. Estas substâncias são polissacarídeos de diferentes unidades básicas estruturais. A qualidade e quantidade das unidades variam entre os organismos (Atlas e Bartha, 1997). A contribuição da microbiota para a quantidade de exsudatos no solo é maior que a das plantas (Coleman et al., 1998).

A união das argilas pode se dar também através de células bacterianas. Na faixa normal de pH dos solos agrícolas, as células de bactérias têm carga líquida negativa, em função dos grupos carboxílicos e aminos presentes na parede celular das mesmas. A adesão microbiana às superfícies das argilas segue o comportamento descrito acima para floculação das argilas, considerando células como colóides negativos (Oades, 1989). E assim como a interação argila-argila, as argilas se aproximam das células bacterianas, mas são fragilmente retidas. Nesta posição, o organismo, a fim de se proteger do meio, excreta polissacarídeos, e algumas vezes na forma de fibrilas, as quais contatam com a superfície das argilas e agem como um adesivo eficiente entre o mineral e a célula (Oades, 1989). Os polissacarídeos excretados pelos microrganismos formam um filme em torno das argilas. Sob secamento do solo este filme é irreversivelmente desidratado e cimenta partículas em agregados estáveis (Harris et al., 1966).

Óxidos de ferro e de alumínio também formam agregados $< 0,002$ mm, através da cristalização dos polímeros presentes na solução do solo, e pela interação com as argilas, através de atração eletrostática.

A união de agregados $< 0,002$ mm formam os agregados de diâmetro $0,002$ a $0,020$ mm. Os agentes ligantes desta classe são compostos orgânicos isolados, que são adsorvidos nas superfícies das argilas e dos óxidos, ou compostos orgânicos associados com polímeros de óxidos de ferro e de alumínio e cátions polivalentes, fazendo a ponte entre as argilas e os óxidos (Figura 7). Estas interações organo-minerais são muito estáveis e sua ação ligante pode se tornar persistente por vários anos, protegendo o material orgânico do ataque dos microrganismos (Tisdall e Oades, 1982; Oades, 1984).

A atuação dos óxidos como agentes ligantes se dá por interações eletrostáticas, pontes de hidrogênio e troca ligante (Oades et al., 1989; Cornejo e Hermosín, 1996). Os óxidos são os agentes mais eficientes em ligar moléculas orgânicas às superfícies das

argilas (Cornejo e Herмосín, 1996). Atuam também como substância cimentante, quando polímeros de óxido de ferro e de alumínio, na forma de gel hidratado, depositados nas superfícies dos agregados se desidratam, em função do regime hídrico do solo (Harris et al., 1966).

Partículas de quartzo presentes no meio podem ser englobadas durante o processo de formação dos agregados. Mesmo não possuindo carga, as partículas de quartzo servem de núcleo de cimentação das interações organo-minerais. Os óxidos de ferro e de alumínio, na forma de gel hidratado, se depositam nas superfícies do quartzo e interagem com as argilas, com os óxidos de ferro e de alumínio e com os polissacarídeos das células microbianas (Harris et al., 1966).

Encapsulamento de células ou colônias de bactérias e hifas de fungos formam agregados de 0,002 a 0,020 mm. Os polissacarídeos excretados por estes microrganismos induzem a orientação de agregados < 0,002 mm ao seu redor. A interação entre os polissacarídeos e os agregados é muito forte, resultando numa cápsula de material orgânico protegido pelo mineral. Neste caso, o material orgânico é altamente protegido, não sofrendo ataque químico nem microbiológico (Oades, 1984; Tisdall, 1994; Tisdall, 1996).

A indução à orientação de agregados também pode ter origem no desenvolvimento do sistema radicular das plantas em crescimento, que influencia os agregados em volta da raiz, devido à retirada de água no local, aumentando as forças de coesão entre as partículas, associado ao efeito ligante dos exsudatos. Os agregados podem ser orientados também pelo próprio crescimento radicular (Tisdall e Oades, 1982), que promove a aproximação das partículas quando a raiz ocupa espaço no solo.

A união dos agregados de diâmetro até 0,020 mm origina os agregados < 0,25 mm, denominados de microagregados por Edwards e Bremner (1967) (Figura 7). Esta união se dá através de material orgânico persistente, definido anteriormente, além de

óxidos amorfos e cristalinos de ferro e de alumínio. Esta classe de agregados é considerada muito estável, principalmente porque contém vários tipos de agentes ligantes, os quais possuem efeito aditivo na agregação (Tisdall e Oades, 1982).

Entre os diâmetros de agregados 0,053 a 2 mm ocorrem processos paralelos de auto-organização do sistema solo em direções opostas. Um processo evolui para o aumento de diâmetro dos agregados e outro para a diminuição (Figura 7).

O processo que conduz ao aumento de diâmetro consiste na união de agregados < 0,25 mm, formados como descrito acima, em agregados > 0,25 mm, através de raízes das plantas vivas e hifas de fungos, principalmente hifas de fungos micorrízicos do tipo vesicular-arbuscular e fungos saprofiticos, quando palha é adicionada ao sistema (Tisdall e Oades, 1982; Thomas et al., 1986; Gupta e Germida, 1988; Miller e Jastrow, 1992; Tisdall, 1996; Jastrow et al., 1998). Raízes e hifas associadas formam uma rede extensa no solo, que unem mecanicamente os microagregados, além de cobri-los com seus exsudatos, os quais se ligam às argilas e aos óxidos, estabilizando os macroagregados formados (Muneer e Oades, 1989; Tisdall, 1994; Tisdall, 1996). Estes agentes ligantes desenvolvem-se no solo durante o período de crescimento das plantas. A rede formada pode persistir por alguns meses após a morte das raízes, devido à interação dos exsudatos com os minerais do solo (Tisdall e Oades, 1982). Quando parte da rede de hifas e raízes morre, este substrato orgânico está depositado dentro da estrutura dos macroagregados. Com isto, a microbiota decompositora deste material produz mais polissacarídeos, que são agentes ligantes, contribuindo para a integridade da macroagregação (Haynes e Beare, 1996; Six et al., 2000). Além disto, o processo de transpiração das plantas, movimenta a água do solo em direção às raízes, o que promove fluxos dentro dos agregados entrelaçados pelas raízes. A água contida no interior do agregado vai em direção à superfície do mesmo, carregando cátions, que estão solúveis

pelo ambiente reduzido. Na superfície, ambiente oxidado, esses cátions precipitam e ficam depositados, atuando como cimento (Bradfield, 1937).

O processo que evolui para a diminuição do diâmetro consiste em agregados de 0,053 a 2 mm formados a partir de matéria orgânica particulada (MOP) (Oades, 1984; Beare et al., 1994; Golchin et al., 1994; Jastrow, 1996; Six et al., 1998; Balesdent et al., 2000). Neste processo, descrito em Golchin et al. (1998) ao invés de agregados menores se unirem para formar agregados maiores, a quebra de macroagregados é que gera microagregados. A MOP originada das raízes e dos resíduos de plantas são colonizadas pela população microbiana da rizosfera, que liberam mucilagens e exsudatos. Estes produtos do metabolismo microbiano, produzidos sobre a superfície da MOP em decomposição, interagem com as partículas minerais isoladas ou agregados < 0,020 mm, esta interação é facilitada pelo íntimo contato entre os resíduos das plantas, os exsudatos e o subsistema mineral do solo. Com o tempo, a colonização microbiana da MOP livre e a subsequente decomposição do carbono desta MOP somado ao aumento de nutrientes liberados na decomposição da mesma, resulta na produção de mais metabólitos microbianos, que são agentes ligantes, os quais reforçam a interação entre MOP e as partículas minerais vizinhas. Como a encrustação da MOP com partículas minerais do solo aumenta devido à contínua decomposição da MOP e a produção de vários agentes ligantes, a MOP forma um centro de intensa atividade biológica ao seu redor, o que resulta na estabilização das partículas minerais agregadas à MOP.

Durante o estágio inicial da decomposição da MOP, o qual ocorre enquanto a MOP é ainda fisicamente intacta, ela atua como um macroagregado estável. O tamanho deste macroagregado estável é função do tamanho, da geometria e do modo de deposição da MOP no sistema solo. Mas a decomposição da MOP continua. Estas partículas orgânicas são quebradas em pequenos pedaços pela ação da fauna do solo e pela decomposição microbiana nas porções expostas a grandes poros, onde oxigênio e

nutrientes não são limitantes. A quebra resulta na produção de macroagregados menores, de microagregados e de uma combinação de ambos. A distribuição do tamanho de agregados liberados da quebra de macroagregados será uma função do tamanho da MOP residual e do conteúdo de agentes ligantes do solo. Entretanto, com a contínua decomposição da MOP, a estabilidade de pequenos macroagregados diminui, restando somente microagregados.

Microagregados liberados devido à quebra de macroagregados consistem de pequenos fragmentos de resíduos de plantas parcialmente decompostos ligados a uma matriz de mucilagens e partículas minerais. A habilidade de microagregados de MOP formar associações estáveis com partículas minerais do solo está relacionada com a extensão da decomposição da MOP. Microagregados com uma fração rica em carboidratos, ou seja, MOP relativamente não decomposta, poderia exibir uma maior estabilidade, porque a MOP é quimicamente atrativa para microrganismos e sua decomposição resulta na produção de mucilagens e metabólitos capazes de ligar partículas do solo. As mucilagens e metabólitos cobrem as partículas minerais em volta da MOP e estabilizam os agregados. Como a decomposição da MOP continua dentro dos microagregados, a porção mais lábil da MOP, como proteínas e carboidratos, é consumida pelos decompositores, permanecendo a fração da MOP mais recalcitrante. Em microagregados contendo MOP recalcitrante, a produção de mucilagens e metabólitos é reduzida a um ponto onde não aumenta mais ou se mantém a uma taxa na qual estes materiais são decompostos e a estabilidade dos microagregados diminui. Estes microagregados, então entram no processo de ordenação que conduz ao aumento do diâmetro dos agregados, sendo envolvidos por hifas e raízes (Figura 7). Os macroagregados de MOP (2 mm) também entram no processo de entrelaçamento por raízes e hifas de fungos para formar agregados > 2 mm.

As plantas contribuem para formação dos macroagregados, fornecendo energia e carbono para atividade microbiana, raízes e MOP. Além disto, fornecem alimento para a mesofauna do solo, a qual excreta compostos orgânicos que atuam como agentes ligantes nesta classe de agregados e realizam a quebra física inicial dos resíduos orgânicos.

Coprólitos de minhocas também são macroagregados e, geralmente, contêm maior concentração de silte e argila, compostos orgânicos e cátions em relação a solo não ingerido por estes organismos, e, ainda, maior concentração de partículas minerais que os coprólitos de microartrópodos, os quais se constituem agregados com diâmetro inferior a 0,1 mm (Tisdall, 1996).

Partículas de quartzo, além de servir como núcleo de cimentação das interações organo-minerais, como descrito anteriormente, podem também ser englobadas por hifas e raízes, desta forma, fazem parte dos agregados em todas as classes de diâmetro.

Como foi visto, o processo de agregação do solo representa uma seqüência de ordenação dos componentes do sistema, resultante de complexas interações dos subsistemas mineral, plantas e microrganismos. Agregados de diâmetro menor são menos complexos e diversificados, com menor quantidade de energia e matéria retida, os quais representam o nível de ordem baixo do sistema solo. Estes servem de elemento para formação de agregados de diâmetro maior, mais complexos e diversificados, com maior quantidade de energia e matéria retida, os quais representam o nível de ordem alto do sistema solo.

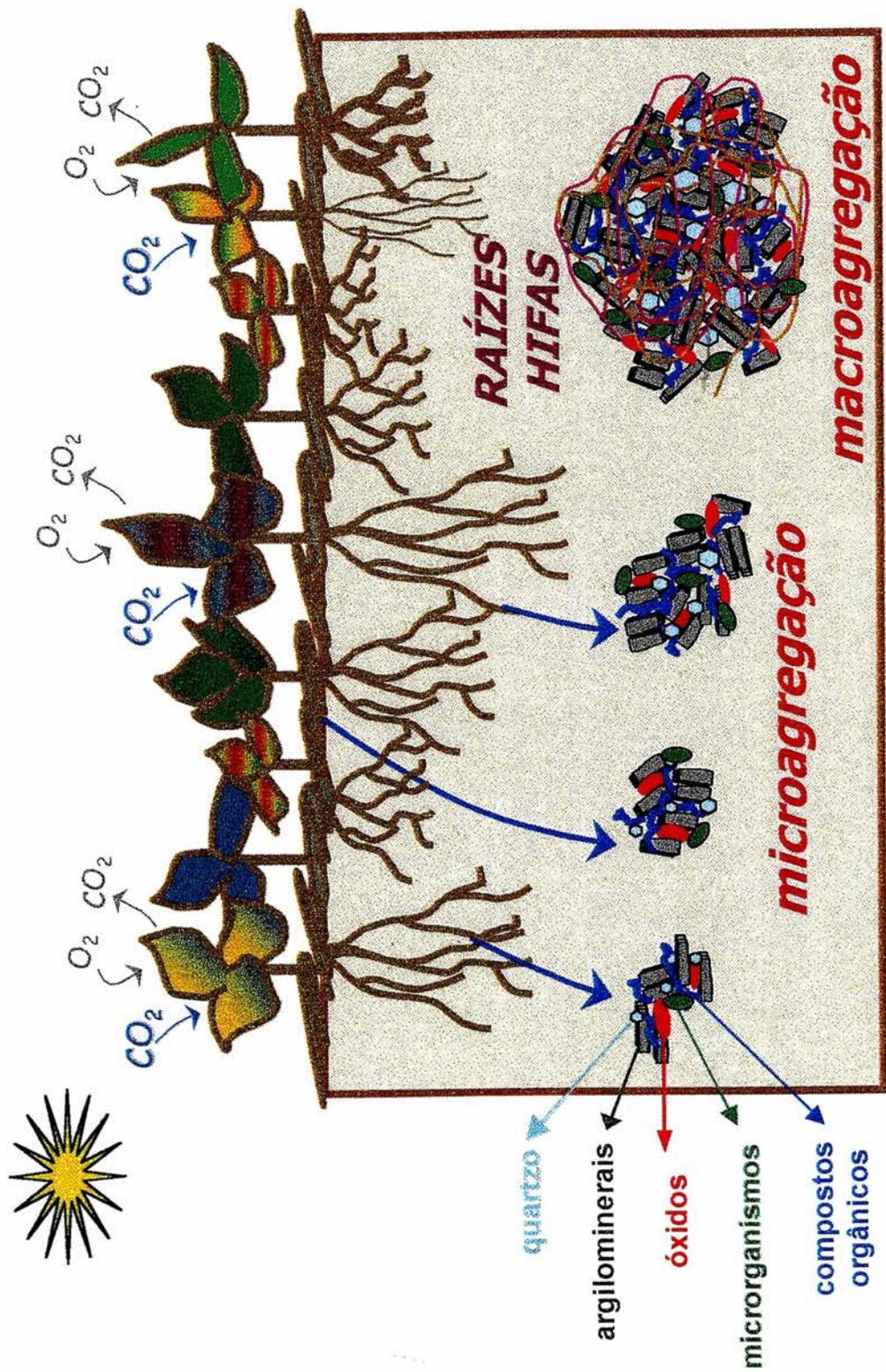
3.2.6. Funcionamento do Sistema Solo

O sistema solo, neste trabalho, é visto como o resultado de complexas interações entre os subsistemas mineral, plantas e microrganismos.

As plantas, pelo processo de fotossíntese, transformam energia luminosa em energia química e produzem a matéria vegetal, rica em energia e carbono. Na forma de parte aérea, raízes e exsudatos, ocorre a entrada de energia e matéria dentro do sistema solo. Esta entrada se dá durante o ciclo vegetativo das plantas, através do sistema radicular, pelo processo de exsudação de compostos orgânicos e pelo desprendimento de células das raízes, e no final do ciclo vegetativo, quando a parte aérea das plantas deita sobre a superfície do solo.

Os microrganismos utilizam o tecido da parte aérea e das raízes e os exsudatos das plantas para extrair energia e carbono que necessitam para a sua atividade e o seu desenvolvimento, havendo a formação de compostos orgânicos como subproduto deste processo. Sendo assim, convertem a energia e a matéria de uma forma para outra, o que caracteriza o fluxo no sistema solo.

Em função do fluxo, os componentes do sistema solo: minerais, íons metais, matéria orgânica e organismos se auto-organizam em estados de ordem. A organização do sistema solo em estados de ordem pode ser representada pelo processo de agregação do solo, onde ocorre a formação de uma hierarquia de estruturas (Figura 8). Este processo está descrito detalhadamente no item anterior (3.2.5. Estados de Ordem do Sistema Solo), mas de uma forma resumida, a seqüência de eventos que caracteriza-o inicia com a interação das partículas minerais, formando agregados na ordem de nanômetros. Os compostos orgânicos, que entram no sistema como produto da interação dos subsistemas plantas e microrganismos, interagem com os agregados minerais, resultando na formação de agregados maiores e de estrutura mais complexa. E à medida que os compostos orgânicos entram no sistema solo, estruturas cada vez maiores são formadas, alcançando um diâmetro em torno de 0,25 mm, o que se define por microagregados. A partir deste tamanho, a formação de estruturas maiores, mais complexas e diversificadas é devido, principalmente, ao entrelaçamento de microagregados



NÍVEL DE ORDEM ALTO

NÍVEL DE ORDEM BAIXO

FIGURA 8. Representação do funcionamento do sistema solo.

pelas raízes das plantas e hifas de fungos. Por serem maiores que 0,25 mm são definidos de macroagregados. Coprólitos de macrorganismos e partes do tecido vegetal encrostados com partículas minerais e/ou microagregados também formam macroagregados. A hierarquia na formação dos agregados representa a história dos sistemas abertos, no sentido de que a estrutura atual foi formada a partir de estruturas menores formadas anteriormente.

O processo de organização conduz o sistema solo a estados de ordem, que são resultantes da magnitude do fluxo de energia e matéria que passa pelo mesmo. A magnitude do fluxo depende da produção de matéria vegetal do subsistema plantas. Quando o fluxo é alto, ou seja, grande quantidade de energia e matéria está entrando através das plantas, o sistema solo tem condições de se auto-organizar em estados de ordem em níveis sucessivamente mais elevados, pois é justo o fluxo que proporciona a energia e matéria para o sistema avançar em nível de organização. As estruturas formadas são constituídas por argilominerais, óxidos, quartzo, partes de tecido vegetal, microrganismos e compostos orgânicos, provenientes da decomposição dos resíduos vegetais e animais e dos exsudatos das plantas e microrganismos. A entrada de energia e matéria na forma de compostos orgânicos promove a interação entre os componentes do sistema solo, resultando em estruturas cada vez mais complexas e diversificadas, em função das inúmeras interações, capacitando o sistema reter a matéria adicionada pelas plantas. Nesta condição, o sistema solo é composto, principalmente, por estruturas grandes, complexas e diversificadas, que contém alta quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos, caracterizando o nível de ordem alto (Figura 8).

Por outro lado, quando a magnitude do fluxo é baixa, pequena quantidade de energia e matéria está entrando na forma de compostos orgânicos, o sistema solo se auto-organiza em estados de ordem, mas as estruturas formadas são menores e mais simples, pois a quantidade de energia e matéria não é suficiente para conduzir o sistema

a formar estruturas complexas. Sendo assim, a interação entre os componentes do sistema não é favorecida, e eles estão na maioria isolados, reduzindo a capacidade de reter a energia e a matéria adicionadas pelas plantas. E, nesta condição, o sistema é composto, principalmente, por estruturas pequenas e simples com pequena quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos, caracterizando o nível de ordem baixo (Figura 8).

Durante a seqüência de ordenação dos componentes do sistema solo (Figura 8) ocorre a atuação de diferentes agentes ligantes das estruturas: os agentes físico-químicos, que promovem a ordenação através das interações organo-minerais, pelos compostos orgânicos associados a cátions polivalentes e aos óxidos; e os agentes biológicos, através da ação mecânica das raízes e das hifas de fungos. Portanto, a entrada dos subsistemas plantas e microrganismos é essencial para que o sistema solo seja capaz de atingir estados de ordem em níveis cada vez mais elevados.

As plantas, neste processo, são a fonte geradora de energia e matéria para a organização do sistema solo. A partir das plantas, o subsistema microrganismos tem condições de desenvolver. E com a ação de ambos ocorre o fluxo de energia e matéria pelo sistema solo, que o conduz à auto-organização. Para conduzir o sistema solo ao nível de ordem alto ou manter este nível é necessário o aporte ou estímulo contínuo do subsistema plantas, que, conseqüentemente, estimulará o subsistema microrganismos. O favorecimento de ambos é fundamental para suprir o sistema solo de resíduos de material vegetal, de compostos orgânicos, de hifas e de raízes, os quais constituem os agentes ligantes e formadores dos agregados do solo. Neste ponto, a diversidade da comunidade vegetal traz benefícios além da produção de energia e matéria. Provavelmente, mais que qualquer outro fator biológico, a composição e a estrutura da comunidade de plantas determina direta ou indiretamente as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Beare et al., 1995). Cada planta possui zonas de

influência diferentes, que são resultado de características específicas das plantas, desde diferenças na composição dos tecidos, na conformação da parte aérea ou qualidade e quantidade de resíduos até diferenças na arquitetura de raízes, eficiência no uso da água, absorção de nutrientes e exsudação de compostos orgânicos (Nielsen et al., 1994; Beare et al., 1995). A diversidade de plantas estimula diferentes espécies da biota do solo, favorecendo interações e o estímulo entre os componentes do sistema solo. O número e a frequência dos tipos de interações bióticas dependem da riqueza das espécies de plantas e de seus modelos de distribuição. A diversidade é alcançada com o cultivo de diferentes espécies de plantas, que determina a heterogeneidade espaço-temporal em vários níveis hierárquicos (Beare et al., 1995), potencializando os efeitos dos agentes formadores e ligantes dos agregados. Entre os organismos do solo, os microrganismos contribuem grandemente para a riqueza e a complexidade das interações, que vão desde simbioses muito específicas até mutualismos difusos (Beare et al., 1995). Quanto mais complexas as interações bióticas, maior a probabilidade de resultar propriedades emergentes importantes na regulação das funções do sistema.

Por outro lado, se não houver aporte ou estímulo contínuo dos subsistemas plantas e microrganismos, o fluxo de energia e matéria diminui e o sistema solo tende à decomposição, ou seja, a um baixo nível de ordem. Se a quantidade de energia e matéria adicionada, via subsistema plantas, não é suficiente para suprir a demanda da microbiota, os microrganismos vão utilizar os agentes ligantes e a matéria orgânica particulada como fonte de energia e carbono, destruindo a ordem obtida. A macroagregação é a primeira a ser destruída, pois depende de agentes ligantes e de matéria orgânica particulada, que são facilmente decomponíveis, e à medida que os microrganismos consomem a fonte de carbono mais acessível, os compostos orgânicos mais resistentes, que estão numa interação mais forte com a matéria mineral, são consumidos. Com isto, a ordem se desfaz e as partículas minerais, nutrientes, compostos

orgânicos e inorgânicos, que estavam fazendo parte da estrutura, ficam livres sujeitos a perdas por mineralização, lixiviação e erosão.

O processo mecânico de quebra dos agregados pelo revolvimento do solo facilita o acesso dos microrganismos ao material orgânico mais protegido, pois expõe a matéria orgânica que estava dentro dos agregados e aumenta a aeração, estimulando a atividade dos agentes decompositores. Neste caso, o processo de decomposição do sistema solo é bastante acelerado, pois ocorre o efeito aditivo da destruição mecânica e microbiológica, podendo ocorrer perdas muito maiores dos componentes do sistema, num período mais curto.

Portanto, o processo de organização do sistema solo é dinâmico. Assim como a biota edáfica utiliza a energia e a matéria adicionada pelo subsistema plantas e os seus metabólitos promovem a organização do sistema solo, ela utiliza a energia e a matéria do sistema solo para sua atividade, o que pode conduzir o sistema solo à decomposição. Em função disto, que o estímulo ao sistema deve ser contínuo, ou seja, a entrada de energia e matéria pelas plantas deve ser contínua para, no mínimo, manter o estado de ordem atual. Nesta condição, fica implícita a instabilidade do sistema solo, a sua dependência à manutenção da magnitude do fluxo para que o estado de ordem atual não se altere.

Nos diferentes estados de ordem do sistema solo surgem as propriedades emergentes. Como foi visto no item 3.1. Noções da Termodinâmica do Não-Equilíbrio, propriedades emergentes são a expressão das relações entre os elementos que compõem o sistema. Quanto mais complexo o sistema, as relações são maiores e, conseqüentemente, as propriedades emergentes são maiores em número e função.

O nível de ordem alto, caracterizado pela presença de estruturas mais complexas, representadas pelos macroagregados e maior quantidade de energia e

matéria retida na forma de compostos orgânicos, as propriedades emergentes se destacam por:

- melhor estrutura do sistema, que confere resistência do solo à erosão hídrica e eólica;
- fluxos de água e ar adequados no sistema, em função da presença de microporos, responsáveis pela retenção de água no solo, e de macroporos, responsáveis pela drenagem da água e aeração;
- estoque de carbono dentro do sistema, retirando CO₂ da atmosfera, e assim, diminuindo o efeito estufa;
- capacidade de troca de cátions (CTC), principalmente devido às superfícies reativas dos compostos orgânicos. Nestes sítios de troca ocorre a retenção de nutrientes, que são essenciais para o desenvolvimento das plantas. Nos mesmos sítios, compostos orgânicos e inorgânicos, que podem ser prejudiciais ao ambiente, ficam adsorvidos e, desta forma, podem ter seus efeitos tóxicos ou poluentes atenuados ou até inativados;
- complexação de compostos prejudiciais ao ambiente pelos compostos orgânicos, em função da reatividade e conformação das moléculas orgânicas;
- aumento de nutrientes para as plantas provenientes dos compostos orgânicos, os quais contém elementos essenciais para as plantas na sua composição;
- favorecimento da microbiota e mesofauna, pela maior quantidade de energia e carbono oriundos dos compostos orgânicos;
- aumento da diversidade da população microbiana e do sistema solo, em função da maior quantidade de carbono, dando condições para o mesmo suportar estresses e servir como filtro e tampão ambiental.

Enfim, as propriedades emergentes resultam no incremento da habilidade do sistema solo produzir quantidades crescentes de energia e matéria, via subsistema

plantas, favorecendo a retroalimentação da energia geradora de ordem. Nesta condição, o sistema solo é capaz de cumprir suas funções, que são de servir como meio para o crescimento das plantas, regular e compartimentalizar o fluxo da água no ambiente, estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera e servir como tampão ambiental. E assim, tem capacidade de atingir qualidade do solo.

No estado de ordem em nível baixo, caracterizado pela presença de estruturas mais simples, representadas pelos microagregados e menor quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos, as propriedades emergentes do sistema solo se destacam por:

- liberação de CO₂ para atmosfera pela decomposição dos compostos orgânicos, contribuindo para o efeito estufa;
- perdas de nutrientes e compostos orgânicos e inorgânicos por lixiviação, contaminando mananciais de água;
- escoamento superficial de água com arraste de partículas minerais, agregados e compostos orgânicos e inorgânicos, provocando erosão do solo e assoreamento de lagos e rios;
- diminuição do desenvolvimento das plantas por problemas de aeração, umidade e deficiência de nutrientes;
- diminuição da população da microbiota e da mesofauna, por falta de fonte de energia e carbono;
- diminuição da diversidade do sistema solo, reduzindo as condições do mesmo suportar estresse.

Enfim, com o passar do tempo, o sistema solo diminui a capacidade de produzir energia e matéria via subsistema plantas, e retroalimentar o sistema para fornecer a energia necessária para sua organização. Nessa condição, o sistema solo não tem habilidade de cumprir suas funções e, portanto, não atinge qualidade do solo.

3.3. Hipóteses

A concepção do funcionamento do sistema solo descrita acima constitui a hipótese geral deste trabalho, a qual foi fundamentada nos princípios da termodinâmica do não-equilíbrio, ramo da ciência que abrange os sistemas abertos.

Partindo da hipótese geral, hipóteses específicas foram deduzidas com a premissa de que o fluxo de energia e matéria no sistema solo se constitui pela matéria vegetal adicionada, via subsistema plantas, e transformada pelo subsistema microrganismos. Durante esta transformação, ocorre a produção de uma seqüência de compostos orgânicos intermediários, com tempo variável de permanência no solo, e liberação de parte da matéria na forma de CO_2 . Os compostos orgânicos que entram interagem com os componentes do sistema solo e promovem a formação de uma hierarquia de estruturas de complexidade e tamanho crescentes.

Sendo assim, as hipóteses específicas deste trabalho são:

1. Sistemas solo que promovem quantidade de energia e matéria adicionada maior que a quantidade liberada geram propriedades emergentes que favorecem a produção de mais energia e matéria, aumentando o fluxo ao longo do tempo.
2. Sistemas solo que aumentam o fluxo, ao longo do tempo, se auto-organizam em estruturas sucessivamente mais complexas, elevando o nível de ordem em relação ao seu estado precedente.

As hipóteses específicas direcionaram a elaboração dos Estudos 1 e 2.

4. ESTUDO 1. FLUXO DE ENERGIA E MATÉRIA EM SISTEMAS SOLO

Este estudo foi conduzido para testar a hipótese 1: “Sistemas solo que promovem quantidade de energia e matéria adicionada maior que a quantidade liberada resultam propriedades emergentes que favorecem a produção de mais energia e matéria, aumentando o fluxo ao longo do tempo”. E teve como objetivo analisar o comportamento do fluxo de energia e matéria, ao longo do tempo, de sistemas solos em produção agrícola.

Neste trabalho, a quantidade de energia e matéria adicionada é representada pela quantidade de carbono que entra no sistema solo através dos resíduos vegetais depositados na superfície do solo e de carbono rizodepositado dentro do sistema. A quantidade de energia e matéria liberada é representada pela quantidade de carbono liberado na forma de CO_2 durante a decomposição microbiana nos diferentes compartimentos da matéria orgânica do solo (Figura 6). A energia está associada ao carbono, pois é responsável pela manutenção da estrutura dos compostos orgânicos e da biota do solo, que realiza as transformações.

Fluxo se refere à quantidade de energia e matéria que passa pelo sistema solo, no sentido de que existe uma quantidade de carbono proveniente da matéria vegetal que é transformada pelos microrganismos. Durante este processo, ocorre a produção de uma seqüência de compostos orgânicos intermediários, com tempo variável de permanência no solo, e liberação de parte da matéria na forma de CO_2 .

Fluxos no sistema solo além da adição de carbono via subsistema plantas e liberação via decomposição microbiana, como adubações orgânicas, erosão e lixiviação, não foram considerados neste estudo.

4.1. Materiais e Métodos

Para atingir o objetivo deste estudo, sistemas solo foram simulados, através do modelo de dinâmica da matéria orgânica do solo Century 4.0 (Figura 6), a fim de obter quantidades de carbono adicionadas e liberadas, ao longo do tempo, e assim analisar o comportamento dos fluxos de energia e matéria.

A simulação consistiu em reproduzir sistemas solo conduzidos há 15 anos em um experimento sobre Argissolo Vermelho Distrófico típico na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS (EEA-UFRGS), no município de Eldorado do Sul, devido a estes sistemas terem sido considerados também para o Estudo 2. Portanto, os dados deste experimento da EEA-UFRGS serviram de referência para rodar o modelo Century 4.0.

O experimento referência foi instalado em 1985 numa área originalmente de campo nativo, que durante o período de 1970 a 1984 foi utilizada para o cultivo de culturas anuais com revolvimento intenso do solo. Na instalação, o solo estava degradado física e quimicamente, tendo $37,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono na camada de 0 a 20 cm de profundidade (Freitas, 1988). Os sistemas solo consistem em diferentes tipos de culturas e graus de revolvimento do solo, que representam, respectivamente, diferentes quantidades de adição e de liberação de carbono.

Os sistemas solo escolhidos para servirem de referência para simulação foram: preparo convencional (*pc*) (uma lavração e duas gradagens para semeadura da cultura de verão) e semeadura direta (*sd*), ambos com dois tipos de culturas: aveia/milho (*am*) (*Avena strigosa* Schreb / *Zea mays* L.) e aveia+vica/milho+caupi (*avmc*) (*Avena strigosa* Schreb + *Vicia sativa* L. / *Zea mays* L. + *Vigna unguiculata* (L.) Walp).

Compondo os sistemas: *pc am*, *pc avmc*, *sd am*, *sd avmc*, todos sem adubação nitrogenada. O sistema *campo nativo* também foi simulado para servir de padrão.

As simulações foram obtidas conforme instruções contidas no manual do modelo Century 4.0. Para isto, foi necessário assumir alguns parâmetros locais. Para os dados de temperatura atmosférica e de precipitação pluviométrica utilizou-se os valores médios do período de 1931 a 1960 para Porto Alegre (Ipagro, 1989). Nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro foi acrescida aos valores do Ipagro (1989) a quantidade de água aplicada no experimento referência na forma de irrigação por aspersão na cultura do milho. Portanto, em outubro, novembro, dezembro e janeiro adicionou-se, respectivamente, 30, 60, 60 e 30 mm nas precipitações, as quais equivaleram à água de irrigação. Os parâmetros locais estão apresentados no Apêndice 1.

Para os teores de areia, silte e argila foram usados os valores médios obtidos por Silva e Mielniczuk (1997) e Fernandes (2000): 525 g kg⁻¹ de areia, 250 g kg⁻¹ de silte e 225 g kg⁻¹ de argila. A densidade do solo foi assumida a média dos valores apresentados por Bayer (1996): 1,54 g cm⁻³.

Na rodagem do modelo Century 4.0, o bioma utilizado para o arquivo fix.100 foi o *mesic/subhumid grassland* (Apêndice 2).

O modelo Century 4.0 roda a partir de um arquivo, que contém as características locais. Para ajustar os parâmetros de matéria orgânica do solo neste arquivo, de forma que reflitam as condições locais e o histórico da área foi produzido inicialmente o arquivo denominado “equilíbrio”. O “equilíbrio” foi simulado por um período de 6000 anos com o parâmetro PRDX(1) (produção potencial mensal da parte aérea das culturas em gramas de biomassa m²mês⁻¹) da cultura CN1 (descrita no Apêndice 5) para atingir 48 Mg ha⁻¹ de carbono total no solo na profundidade de 0 a 20 cm, dado médio obtido por Lovato (2001) em quatro áreas de campo nativo próximas ao experimento que serviu de referência para a simulação.

Aplicou-se sobre o arquivo “equilíbrio” o comando “getorg” com a finalidade de ajustar o modelo aos parâmetros locais, e com isto obteve-se o arquivo local. A partir deste, produziu-se o sistema *campo nativo* no período de 1900 a 2150 com o mesmo valor do parâmetro PRDX(1) da cultura CN1 utilizado no “equilíbrio”, para que o carbono total no solo se mantivesse em 48 Mg ha⁻¹.

A situação anterior aos sistemas solo descritos anteriormente consistiu no arquivo “base”, produzido a partir do ano 1900 com a cultura CN1A (Apêndice 5), tendo o parâmetro PRDX(1) ajustado para que em 1984 o carbono total no solo fosse de 37,2 Mg ha⁻¹ na profundidade de 0 a 20 cm.

Os sistemas solo *pc am*, *pc avmc*, *sd am* e *sd avmc* foram simulados utilizando o cenário do experimento referência. Na Tabela 1 estão apresentadas as práticas de manejo aplicadas em cada mês nos sistemas solo. Os cenários dos sistemas estão apresentados no Apêndice 3. Os parâmetros dos comandos e das culturas utilizados nos cenários estão apresentados nos Apêndices 4 e 5, respectivamente. Como o modelo Century 4.0 não contempla o uso de culturas consorciadas, para os sistemas que incluem gramíneas e leguminosas, os parâmetros das culturas referentes à relação C:N foram alterados para o valor médio entre gramíneas e leguminosas dado pelo modelo. Para considerar o nitrogênio proveniente das culturas leguminosas para o sistema solo foi aplicado nitrogênio como adubo mineral nos cenários simulados.

Resultados preliminares mostraram que para os diferentes sistemas, as simulações com os parâmetros originais do modelo não estimaram os dados observados por Bayer (1996) e Lovato (2001) no experimento referência. Isto porquê a quantidade de carbono total no solo estimada não diferiu entre sistemas com diferentes graus de revolvimento do solo e produção de matéria seca semelhantes. Evidenciando que o modelo, com os parâmetros originais, não simulou adequadamente o efeito do revolvimento sobre a dinâmica do carbono no solo.

TABELA 1. Práticas de manejo aplicadas nos sistemas solo, consideradas para a simulação no modelo Century 4.0.

Meses	Sistemas solo			
	preparo convencional		semeadura direta	
	<i>pc am</i> ⁽¹⁾	<i>pc avmc</i>	<i>sd am</i>	<i>sd avmc</i>
Janeiro				
Fevereiro	senescência culturas verão colheita dos grãos		senescência culturas verão colheita dos grãos	
Março	herbicida rolo-faca		herbicida rolo-faca	
Abril	semeadura direta culturas inverno		semeadura direta culturas inverno	
Maio				
Junho				
Julho				
Agosto				
Setembro	senescência culturas inverno revolvimento do solo		senescência culturas inverno herbicida rolo-faca	
Outubro	semeadura culturas verão		semeadura direta culturas verão	
Novembro				
Dezembro				

⁽¹⁾ *pc* = preparo convencional; *sd* = semeadura direta; *a* = aveia; *m* = milho; *v* = vica; *c* = caupi

Para ajustar o modelo aos dados observados, foram alterados os parâmetros *dec5* e *P1CO2B(2)* no arquivo *fix.100*, conforme proposto por Fernandes e Mielniczuk (2001). *Dec5* se refere à taxa de decomposição do compartimento lento da matéria orgânica do solo e tem como valor original 0,20 para o bioma utilizado. *P1CO2B(2)* se refere à declividade da reta que controla o fluxo de liberação de CO₂ do compartimento ativo da matéria orgânica do solo (Figura 6), e o valor original é de 0,68. A escolha destes parâmetros foi devido ao aumento na quantidade de carbono promover a agregação do solo (Silva e Mielniczuk, 1997), que por sua vez aumenta a proteção física da matéria orgânica. Com isto, sistemas em preparo convencional, com maior

revolvimento do solo, rompem a agregação, aumentam a taxa de decomposição do compartimento lento e aumentam o fluxo de liberação de CO₂ do compartimento ativo (aumenta ambos parâmetros). Por outro lado, sistemas em semeadura direta, com mínimo revolvimento, que favorecem a manutenção da agregação do solo diminuem a taxa de decomposição do compartimento lento e diminuem o fluxo de liberação de CO₂ do compartimento ativo (diminui ambos parâmetros).

Sendo assim, os sistemas em preparo convencional foram simulados com os parâmetros *dec5* e *P1CO2B(2)* do arquivo *fix.100* alterados para 0,26 e 0,72, respectivamente, e os sistemas em semeadura direta, para 0,16 e 0,60, respectivamente, para obter o melhor ajuste dos dados de carbono adicionado pelas culturas e de carbono total no solo com o experimento referência. Na Tabela 2 constam os parâmetros utilizados para cada sistema solo e os respectivos dados observados por Lovato (2001).

A quantidade de carbono adicionada ao sistema solo foi obtida pela variável de saída no modelo Century 4.0 denominada *cinput*, a qual se refere à entrada anual de carbono ao solo. E a quantidade de carbono liberada do sistema foi obtida pela variável de saída *resp(1)*, a qual se refere à respiração anual de carbono na forma de CO₂ da decomposição totalizada de todos os compartimentos da matéria orgânica do solo. Estas variáveis geram resultados acumulados, ou seja, o valor mensal é a soma dos meses anteriores com o mês atual, em função disto as quantidades mensais de carbono adicionadas e liberadas foram calculadas por diferença. O carbono total no solo foi obtido pela variável de saída *somtc*.

4.2. Resultados e Discussão

A quantidade de carbono adicionada nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0. consta na Figura 9A. Os parâmetros de culturas foram os mesmos para simular os sistemas nos diferentes graus de revolvimento do solo. Por isto, as diferenças

TABELA 2. Parâmetros do modelo Century 4.0 para os sistemas solo, valores estimados e observados de carbono adicionado pela parte aérea e raízes e de carbono orgânico total no solo em setembro de 1998.

Sistemas solo	N adicionado ⁽³⁾ (kg ha ⁻¹)		Parâmetros Century 4.0		Carbono adicionado parte aérea e raízes (Mg ha ⁻¹)			Carbono no solo (0-20cm) para setembro 1998 (Mg ha ⁻¹)	
	inverno	verão	dec5	P1CO ₂ B(2)	estimado	observado ⁽⁴⁾	estimado	observado ⁽⁴⁾	
<i>campo nativo</i> ⁽¹⁾			0.20	0.68	-	-	47.98	48.00	
<i>pc</i> ⁽²⁾	0	0	0.26	0.72	aveia	1.61	29.64	29.94	
					milho	2.50			
<i>av mc</i>	20	45	0.26	0.72	total	4.11	35.90	34.89	
					aveia+vica	3.76			
					milho+caupi	3.49			
<i>sd</i>	10	0	0.16	0.60	total	7.25	36.44	36.45	
					aveia	1.61			
					milho	2.50			
<i>av mc</i>	40	40	0.16	0.60	total	4.11	42.27	42.38	
					aveia+vica	3.76			
					milho+caupi	3.49			
					total	7.25			

(1) Parâmetros originais para o bioma *mesic/subhumid grassland* do Century 4.0.

(2) pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi

(3) Nos sistemas simulados. No experimento referência estes sistemas, cujos dados observados por Lovato (2001) constam na Tabela, não receberam adubação nitrogenada.

(4) Lovato (2001)

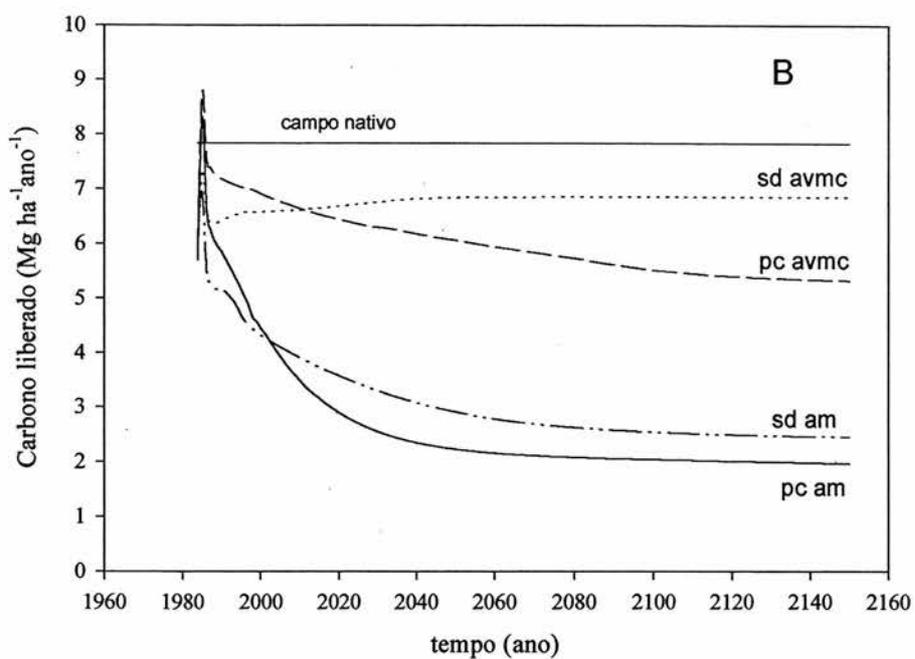
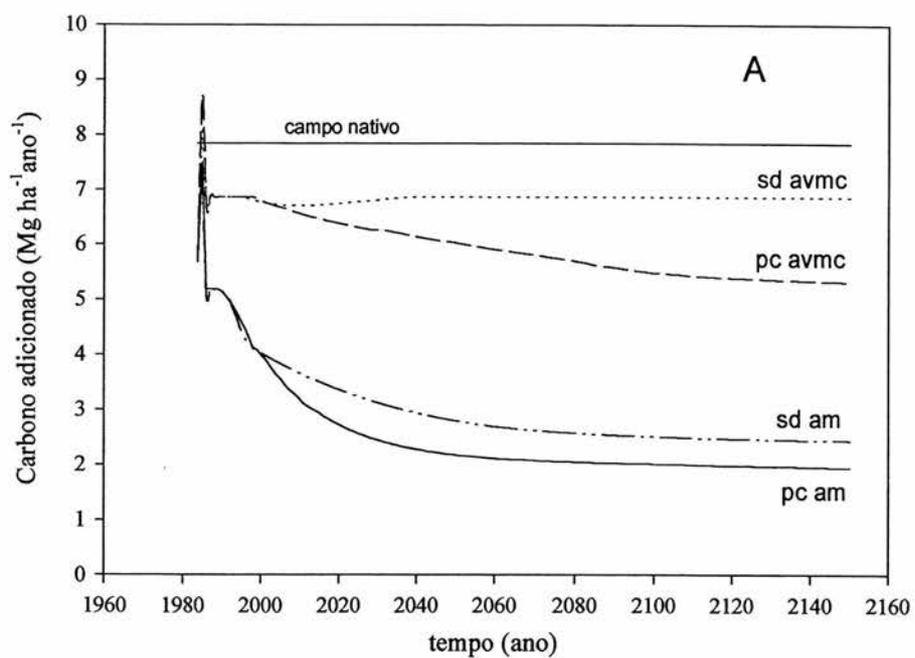


FIGURA 9. Quantidade anual de carbono adicionada (A) e liberada (B), ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.

pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

nas quantidades de carbono adicionadas entre os graus de revolvimento, mesmo que pequenas, foram resultado da interação do revolvimento do solo e da quantidade de nitrogênio no sistema ao longo do tempo. O revolvimento diminui o estoque de carbono orgânico do solo no tempo (Bayer et al., 2000a; Bayer et al., 2000b; Lovato, 2001), reduzindo a capacidade produtiva do sistema. A diferença entre sistemas de culturas foi devido, principalmente, à adição de leguminosas, que aumentam o estoque de nitrogênio no solo (Amado et al., 1999; Amado et al., 2000; Lovato, 2001) e, conseqüentemente, a capacidade produtiva do sistema.

A quantidade de carbono liberada dos sistemas (Figura 9B) foi proporcional ao carbono adicionado, refletindo a dependência da biota à quantidade disponível de carbono para realizar sua atividade.

A dinâmica das quantidades de carbono adicionadas e liberadas do sistema solo ao longo do tempo resulta na quantidade de carbono total no solo (Dalal e Mayer, 1986; Bayer et al., 2000b). O carbono total no solo, ao longo do tempo, nos sistemas simulados consta na Figura 10. Os sistemas de maior adição apresentaram maior quantidade de carbono total no solo. Dentro de cada sistema de culturas, houve diferença quanto ao grau de revolvimento do solo, o qual favorece as condições para o consumo de carbono pela microbiota decompositora, diminuindo a quantidade com o passar do tempo.

Analisando os resultados obtidos pela simulação, observa-se que para o sistema *sd am* o modelo Century 4.0 estimou uma perda maior de carbono do que ocorreu na realidade (Figura 9B). Pelos dados de Lovato (2001) no décimo terceiro ano o sistema *sd am* foi semelhante ao sistema *pc avmc* quanto à quantidade de carbono total no solo. No equilíbrio, a estimativa de Lovato (2001) foi de 29 Mg de carbono ha⁻¹ na profundidade de 0 a 17,5 cm para o *sd am* e de 30 Mg de carbono ha⁻¹ para o *pc avmc*. Pela simulação, o *sd am* a partir dos 20 anos diminuiu rapidamente a quantidade de

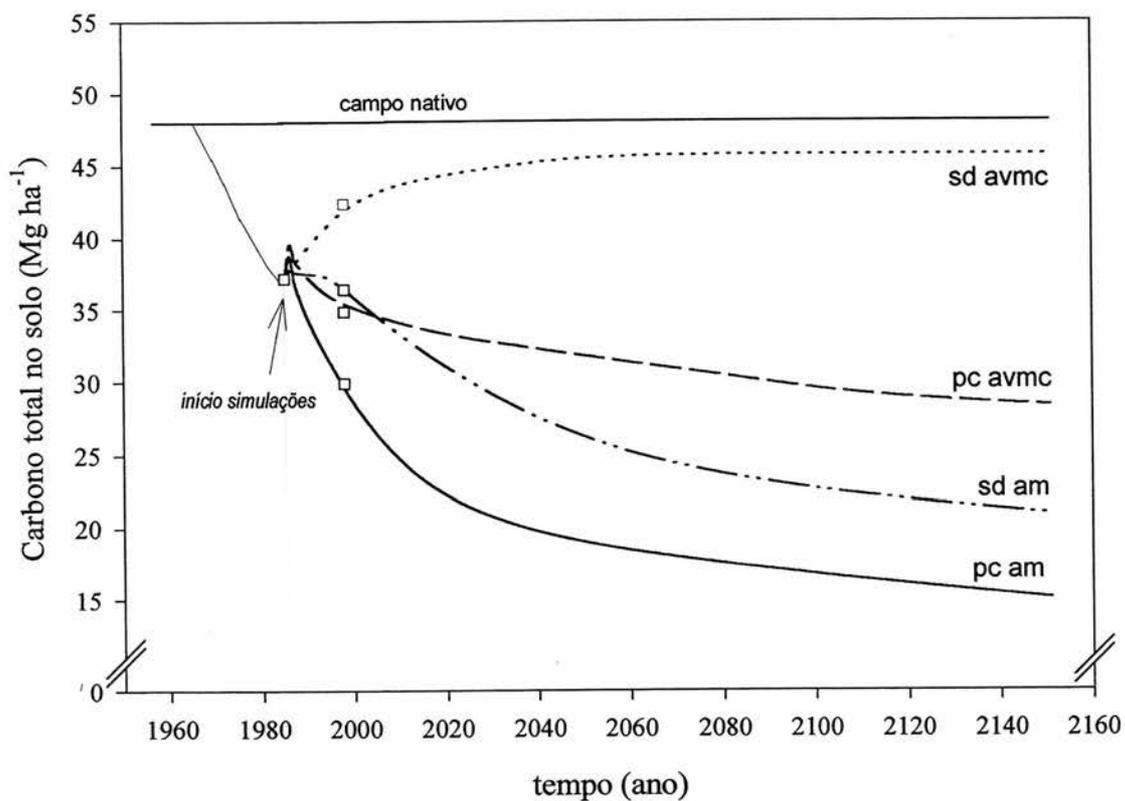


FIGURA 10. Carbono total no solo, ao longo do tempo, nos sistemas simulados pelo modelo Century 4.0 e os dados observados por Lovato (2001) no décimo terceiro ano do experimento referência.

pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

carbono no solo (Figura 10), como resultado das quantidades adicionadas e liberadas (Figura 9). O esperado era que a tendência observada nos primeiros treze anos permanecesse, ou seja, que os sistemas *sd am* e *pc avmc* apresentassem comportamento semelhante quanto à quantidade de carbono total no solo. Com isto, percebe-se que ainda existem ajustes a serem feitos nos parâmetros do Century 4.0 para simular sistemas em condições de clima subtropical. Ciente deste desvio, a discussão a seguir será em função dos resultados gerados pelo modelo.

Depois de um período de tempo, a quantidade de energia e matéria retida dentro dos sistemas é função do comportamento do fluxo, ou seja, de que forma ocorreu a diferença entre as quantidades de carbono adicionadas e liberadas ao longo do tempo.

Na Figura 11 estão apresentados os balanços mensais de carbono (quantidade de carbono adicionada menos quantidade liberada, em cada mês) em três épocas de simulação dos sistemas. As quantidades de carbono mensais adicionadas e liberadas estão apresentadas no Apêndice 6.

Aos dez anos (Figura 11A) após ter iniciado os eventos de manejo que caracterizam os sistemas solo, observa-se que o comportamento dos sistemas foi muito semelhante. As épocas de balanço positivo coincidiram com o final do ciclo vegetativo das culturas (fevereiro e setembro) (Tabela 1), quando ocorreu a maior quantidade adicionada de carbono ao sistema. Por outro lado, as épocas de balanço negativo coincidiram com o período de semeadura das culturas de inverno (abril) e revolvimento do solo e semeadura das culturas de verão (outubro), práticas que promovem o aumento na quantidade de carbono liberada do sistema.

Os balanços mais positivos e mais negativos foram associados aos sistemas de maior adição, que são aqueles com as culturas *avmc*. Em abril (Figura 11A), quando as culturas de todos os sistemas foram semeadas por semeadura direta (Tabela 1), os balanços foram exatamente iguais nos sistemas com mesmo tipo de culturas, que aos 10

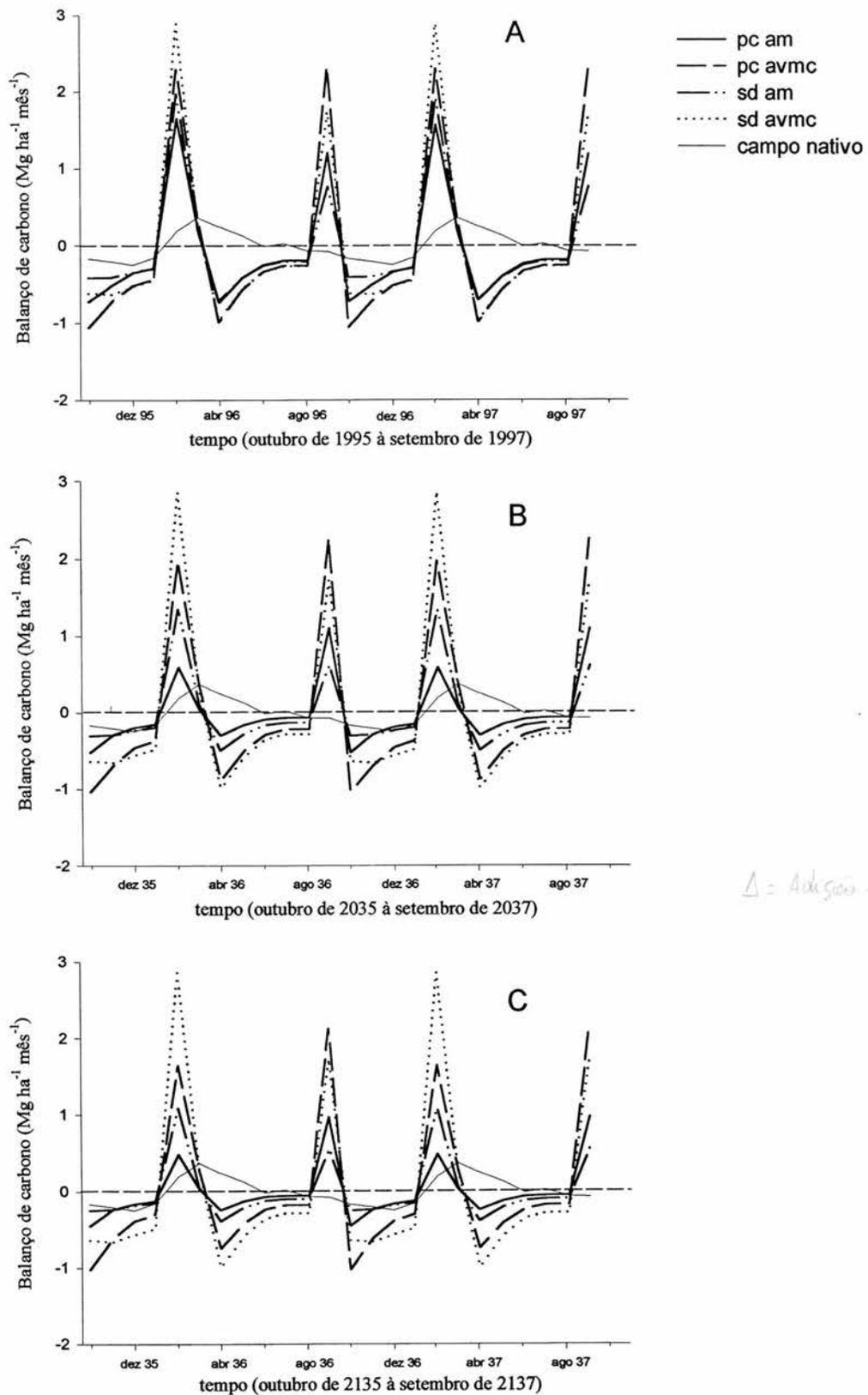


FIGURA 11. Balanço mensal de carbono⁽¹⁾ nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0 nos 10 (A), 50 (B) e 150 (C) anos.

(1) diferença entre as quantidades mensais de carbono adicionadas e liberadas em cada mês.
pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

anos, possuíram a mesma quantidade de carbono adicionada (Figura 9). Em outubro, os sistemas com as mesmas culturas e, portanto, com quantidade de carbono adicionada semelhante, diferiram quanto ao grau de revolvimento do solo, aumentando o balanço negativo para os sistemas com maior grau de revolvimento, em função da maior liberação de carbono.

Em setembro, assim como ocorreu em fevereiro, os balanços mais positivos foram dos sistemas de maior adição, mas, ao contrário de fevereiro, os sistemas em preparo convencional apresentaram balanço maior em relação aos sistemas de mesma adição em semeadura direta. Este fato foi devido ao revolvimento do solo, que incorpora os resíduos culturais, aumentando a quantidade de carbono adicionada ao sistema neste mês. A incorporação também favorece o contato dos resíduos com a microbiota decompositora, além de favorecer as condições ambientes para sua atividade. Em função disto, no mês seguinte (outubro), estes sistemas que tiveram o revolvimento do solo apresentaram o balanço mais negativo, indicando a maior liberação de carbono.

Os sistemas em semeadura direta (*sd am* e *sd avmc*) também apresentaram balanço positivo e negativo nos meses de setembro e outubro, respectivamente, pois foi a época que ocorreu a aplicação de herbicida e a rolagem das culturas de inverno e a semeadura das culturas de verão (Tabela 1). Com isto, em setembro houve um incremento na adição de carbono ao sistema, mas em quantidade menor que os sistemas em preparo convencional, porque a maioria dos resíduos ficam na superfície do solo, já que a semeadura direta revolve o solo apenas na linha de semeadura. Desta forma, a adição se dá espaçada no tempo. E, pelo fato da adição nos sistemas em semeadura direta ter sido menor que os sistemas em preparo convencional, em função do menor contato dos resíduos com o solo, os balanços dos sistemas *sd am* e *sd avmc* em relação

aos respectivos sistemas de culturas em preparo convencional foram menos negativos em outubro, por ocasião da semeadura das culturas de verão.

O balanço no sistema *campo nativo* apresentou comportamento distinto dos demais, pois se encontrava num estado estável no período de simulação dos eventos. Nesta situação, o fluxo de energia e matéria se manteve constante. O balanço mensal no *campo nativo* foi bem próximo a zero, com leves oscilações entre balanço positivo e negativo, que coincidiram com os períodos de variação da temperatura atmosférica. No inverno, as temperaturas mais baixas diminuem a atividade microbiana, favorecendo o balanço positivo. No verão, a temperatura mais alta aumenta a atividade microbiana e o balanço se torna negativo. Estas diferenças na temperatura também afetaram os balanços dos demais sistemas solo, mas as práticas de manejo foram mais determinantes nas quantidades de carbono adicionadas e liberadas, sendo as responsáveis pelas variações observadas.

Aos 50 anos após o início dos eventos (Figura 11B), o comportamento geral dos balanços no ano foi semelhante aos 10 anos. Os picos de ganho e de perda permaneceram nos mesmos meses, mas as diferenças entre os sistemas começaram a aparecer. Em abril, quando aos 10 anos os sistemas com mesmo tipo de culturas não diferiram, aos 50 anos apresentaram uma pequena diferença, onde os sistemas com maior grau de revolvimento diminuíram o valor negativo dos balanços. O sistema *pc am* apresentou oscilações mais suaves durante o ano, se aproximando a zero. Permaneceu o pico agudo com balanço positivo no mês do revolvimento do solo no *pc am*, quando houve a incorporação dos resíduos culturais. A proximidade de zero, tende à situação de fluxo estável como foi o caso do sistema *campo nativo*.

Aos 150 anos (Figura 11C), os picos de ganho e de perda permaneceram nos mesmos meses, mas foram menos agudos, fazendo com que as oscilações fossem mais suaves, se aproximando de zero, estabilizando o fluxo. Com exceção do sistema *sd*

avmc, que praticamente não alterou o comportamento do balanço nos três períodos de simulação analisados (10, 50 e 150 anos).

Somando os balanços mensais teve-se o balanço anual (Figura 12), que representou a diferença entre as quantidades anuais de carbono adicionadas e liberadas. No ano de 1986, os sistemas em semeadura direta apresentaram um pico de balanço positivo, devido à quantidade adicionada do sistema anterior ao ano de 1985 (o “base”) somada à adição dos sistemas solo em estudo (a partir do ano de 1985) e menor quantidade liberada, em função do não revolvimento do solo. No próximo ano (1987) ocorreu uma queda drástica no balanço de todos os sistemas, devido à adição ter sido menor que a adição do sistema anterior (o “base”). Com isto, houve a liberação do carbono proveniente do sistema anterior à 1985 e os sistemas em estudo não tiveram capacidade de repor a mesma quantidade. Nos sistemas com grau de revolvimento maior, que favoreceu a liberação de carbono, os balanços foram mais negativos. O *pc am*, com menor quantidade de carbono adicionada, resultou no menor valor de balanço observado neste período. A partir de então, os balanços tenderam a subir novamente. Os sistemas em semeadura direta aumentaram o balanço por um período curto e voltaram a cair. E os sistemas em preparo convencional subiram, ambos tendendo a zero. Com o passar do tempo, o balanço de todos os sistemas tendeu a zero, como o sistema *campo nativo*, que já se encontrava próximo a zero no período de simulação dos sistemas. Isto foi devido à auto-organização dos sistemas, de modo que o próprio fluxo se manteve constante após determinado tempo (Tabela 3). As oscilações mensais permaneceram constantes e, conseqüentemente, o balanço anual se manteve constante.

Mas no período inicial, até próximo ao ano 2030, período relativamente grande se for considerada uma geração humana, ocorreram diferenças quanto aos sistemas de culturas (adições) e graus de revolvimento do solo (liberações). O sistema de maior adição e menor grau de revolvimento do solo (*sd avmc*) teve balanço positivo durante

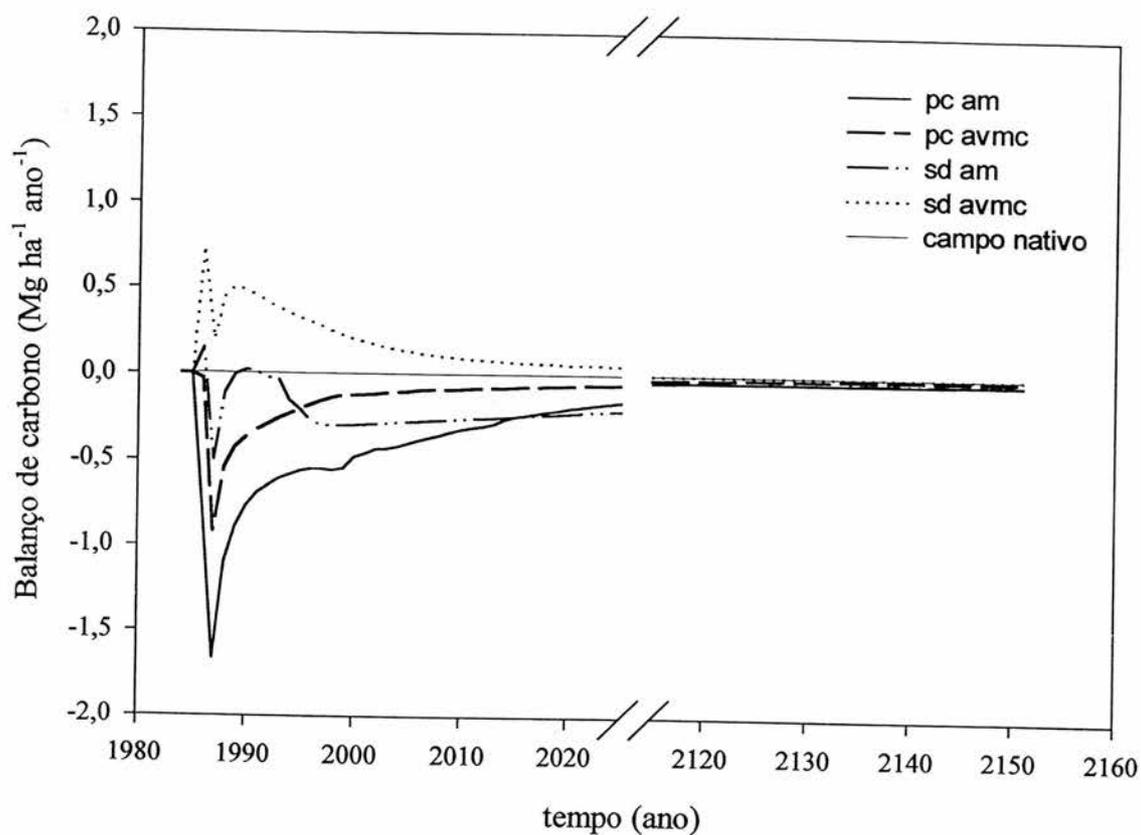


FIGURA 12. Balanço anual de carbono⁽¹⁾, ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.

(1) diferença entre as quantidades anuais de carbono adicionadas e liberadas.

pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

TABELA 3. Quantidades de carbono adicionadas (ad) e liberadas (lib), em Mg ha^{-1} , o balanço entre elas (ad-lib) e a relação F/R (ad/lib) nos sistemas solo simulados no modelo Century 4.0 em diferentes tempos após o início dos eventos.

tempo após início (anos)	<i>pc am</i> ⁽¹⁾				<i>sd am</i>				<i>sd avmc</i>				<i>campo nativo</i>							
	ad	lib	ad-lib	F/R	ad	lib	ad-lib	F/R	ad	lib	ad-lib	F/R	ad	lib	ad-lib	F/R				
	Mg ha ⁻¹				Mg ha ⁻¹				Mg ha ⁻¹				Mg ha ⁻¹							
10	4,75	5,31	-0,56	0,89	6,85	7,05	-0,20	0,97	4,63	4,83	-0,20	0,96	6,87	6,54	+0,33	1,05	7,85	7,84	+0,01	1,00
20	3,64	4,04	-0,40	0,90	6,70	6,79	-0,09	0,99	3,87	4,14	-0,27	0,93	6,73	6,59	+0,14	1,02	7,85	7,84	+0,01	1,00
50	2,36	2,46	-0,10	0,96	6,23	6,26	-0,03	1,00	3,04	3,21	-0,16	0,95	6,84	6,78	+0,06	1,01	7,85	7,84	+0,01	1,00
100	2,04	2,08	-0,04	0,98	5,64	5,69	-0,04	0,99	2,57	2,61	-0,05	0,98	6,87	6,86	+0,01	1,00	7,85	7,84	+0,01	1,00
150	1,97	2,00	-0,03	0,98	5,36	5,37	-0,01	1,00	2,45	2,48	-0,03	0,99	6,87	6,86	+0,01	1,00	7,85	7,84	+0,01	1,00

(1) pc= preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia, m = milho; v = vicia; c = caupi.

todo o período simulado. O mesmo sistema de cultura em preparo convencional do solo, mesmo que uma vez ao ano (*pc avmc*), teve balanço negativo em todo período simulado. Entre estes dois sistemas ficou evidente o efeito do revolvimento do solo no favorecimento das perdas. A incorporação dos resíduos favorece o contato da fonte de energia e carbono com os microrganismos, além do revolvimento favorecer a aeração e expor a matéria orgânica que está dentro dos agregados, facilitando o consumo do carbono pela microbiota decompositora com conseqüente liberação de CO₂.

Os sistemas com as culturas *am* apresentaram balanço negativo, e, da mesma forma, o revolvimento do solo ocasionou diferenças, sendo que o sistema em preparo convencional teve o balanço mais negativo. Mas o sistema *pc am* se aproximou de zero em menor tempo que o *sd am*. O revolvimento do solo aumenta as perdas e com isto aumenta a velocidade de desestruturação do sistema. No sistema *pc am* ocorreu o efeito aditivo da baixa adição de energia e matéria e do revolvimento do solo referido na Fundamentação Teórica (item 3.2.6. Funcionamento do Sistema Solo), que conduz os sistemas para baixo nível de ordem. No caso do sistema *sd am*, com baixo grau de revolvimento do solo, a desestruturação ocorreu mais lentamente, mais pelo efeito biológico em função da pouca adição de energia e matéria que não foi suficiente para suprir a demanda da microbiota e, sendo assim, esta consumiu o carbono do solo. Com isto, a velocidade das perdas foi menor e o *sd am* estabilizou o fluxo num espaço de tempo maior. Os sistemas com as culturas *avmc* também apresentaram este mesmo comportamento. Bayer et al. (2000b) observaram no experimento que serviu de referência para a simulação deste estudo, através da determinação do coeficiente de decomposição do carbono orgânico do solo (k_2), que o revolvimento do solo praticamente dobrou a velocidade de passagem do fluxo em relação aos sistemas em semeadura direta.

Como foi visto na Fundamentação Teórica, item 3.1. Noções da Termodinâmica do Não-Equilíbrio, o fluxo de energia e matéria gera aumento na atividade intrínseca do sistema, tornando-o mais ativo e sensível. Nesta situação em que o sistema está altamente sensível a si mesmo e às flutuações da sua própria atividade, podem emergir estados estáveis de comportamento. E para manter o nível de ordem, o sistema é dependente do fluxo atual, da quantidade de energia e matéria que está passando por ele. Neste sentido, a dependência do sistema ao fluxo está diretamente relacionado com sua instabilidade.

As oscilações mensais no balanço (Figura 11) indicam a instabilidade dos sistemas, porque demonstram a sensibilidade às alterações no fluxo de energia e matéria. Sistemas com amplitude de oscilações maior são mais instáveis. Sendo assim, os sistemas com maior adição foram os mais instáveis, indicando que são altamente dependentes da manutenção das quantidades de energia e matéria envolvidas no fluxo para conservar o estado atual. Por outro lado, os sistemas com menor adição apresentaram oscilações suaves, que se aproximaram de zero. Neste sentido, a estrutura provavelmente é menos complexa, mais dependente das partículas minerais, de forma que o fluxo não afeta da mesma forma que afeta os sistemas de alta adição.

Se por um lado, o balanço mensal indica a instabilidade do sistema, a sua dependência ao fluxo, por outro lado, o balanço anual indica a estabilidade do fluxo. Fluxo estável significa estabilidade da estrutura, pois o fluxo estável mantém o estado de ordem atual. Observando o balanço anual (Figura 12), verifica-se que os sistemas de maior adição foram os primeiros a aproximar-se de zero, fluxo constante. Enquanto que os sistemas de baixa adição continuaram por um período mais longo, em valores razoavelmente abaixo de zero.

Com base na teoria do funcionamento dos sistemas abertos, os sistemas de baixa adição e, portanto, com baixo fluxo, conduzem o sistema à desestruturação pela

falta de energia e matéria para manter a ordem, e, por outro lado, os sistemas de alta adição e, portanto, com fluxo alto, conduzem o sistema à organização. Os resultados do balanço anual (Figura 12) sugerem que os sistemas de maior adição tenderam com velocidade maior à organização, pois o fluxo se torna constante em menor tempo. Ao contrário, dos sistemas de baixa adição, que tenderam mais lentamente à desestruturação.

Sendo assim, os sistemas de maior adição atingem estado estável mais rápido e são mais instáveis, pela análise do balanço mensal, indicando que para conservar a organização atingida é preciso manter a magnitude do fluxo atual.

Quando os sistemas em produção agrícola são comparados sob este enfoque ao sistema campo nativo, verifica-se que o *campo nativo* teve o fluxo mais alto (Tabela 3), e por este motivo foi instável, altamente dependente do fluxo para manter seu estado atual. Mas as oscilações no balanço mensal (Figura 11) foram as mais suaves, o que é um contraponto à instabilidade. Isto acontece porque o sistema campo nativo é intacto, não é manejado pelo homem. A estrutura não é alterada, enquanto que nos sistemas em produção agrícola são empregadas várias práticas de manejo durante o ano. Se mesmo assim um sistema em produção agrícola possui fluxo alto e estável é porque, teoricamente, está mantendo o estado de ordem atual, o que significa que está havendo a retroalimentação suficiente para manter a ordem.

Coleman et al. (1998) propuseram medir qualidade do solo através da relação fotossíntese/respiração (F/R), que é a relação entre as quantidade de carbono adicionadas e liberadas no sistema solo. Quando a relação F/R é maior que um, o sistema é considerado com qualidade; relação F/R igual a um, o sistema está no seu estado estável; relação F/R, menor que um, o sistema não tem qualidade.

Os valores das quantidades de carbono adicionadas e liberadas, o balanço entre elas e a relação F/R, em diferentes tempos após o início dos eventos, estão apresentados

na Tabela 3. A princípio, as diferenças entre as relações F/R parecem pequenas, mas graficamente (Figura 13) o comportamento foi equivalente ao do balanço. Analisando o período inicial da simulação, através da relação F/R, pode-se inferir que os sistemas em preparo convencional aumentaram a sua qualidade, pois o valor da relação F/R aumentou. E por outro lado, o sistema *sd avmc* perdeu a sua qualidade porque diminuiu o valor da relação F/R.

Os valores na Tabela 3 mostram que o sistema *pc avmc* aos 50 anos apresentou relação F/R igual a um, mas o balanço indicou uma perda líquida de 30 kg de carbono $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. O sistema *sd avmc* aos 100 anos apresentou relação F/R igual a um e o balanço indicou um ganho líquido de 10 kg de carbono $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. Portanto, ambos sistemas se encontravam num estado estável, mas o *pc avmc* estava perdendo energia e matéria, enquanto o *sd avmc* estava ganhando. A análise da relação F/R para avaliação da qualidade do solo proposta por Coleman et al. (1998) é superficial se as quantidades envolvidas não forem consideradas, pois todos os sistemas tendem a uma relação F/R igual a um com quantidade de energia e matéria retida consideravelmente diferentes. Aos 150 anos, por exemplo, quando os sistemas *pc avmc* e *sd avmc* apresentaram relação F/R igual a um, a quantidade de carbono retida foi de 28,6 e 45,7 Mg ha^{-1} , respectivamente, conforme simulação do modelo Century 4.0. Como a quantidade de energia e matéria retida dentro dos sistemas é fundamental para que as propriedades emergentes sejam capazes de habilitar o sistema solo exercer suas funções, a relação F/R fica aquém desta análise.

Janzen et al. (1998) também analisaram esta relação para inferir sobre o estoque de carbono no sistema. Eles afirmaram que as taxas de adição e liberação de carbono tendem a convergir (F/R igual a um) com o passar do tempo. Segundo os autores, uma mudança nas práticas de manejo pode desestruturar a condição atual, resultando em ganho ou perda temporária no estoque de carbono até a relação F/R

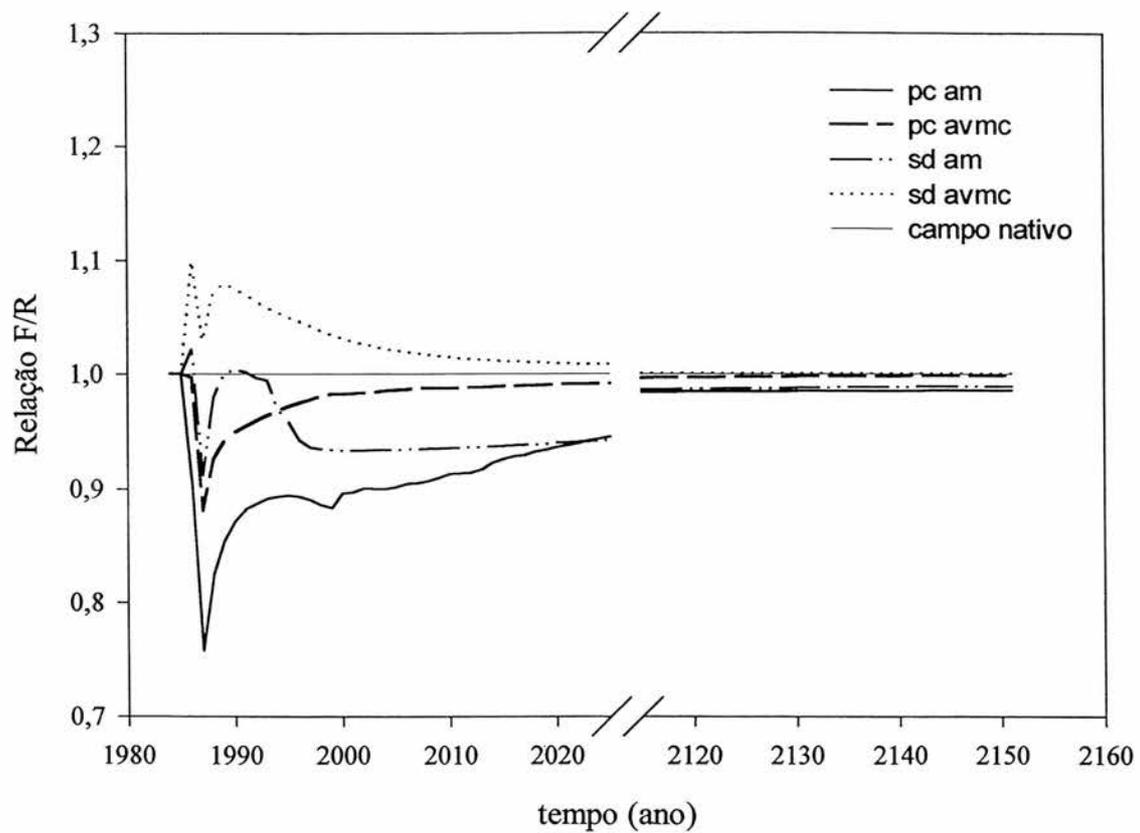


FIGURA 13. Relação $F/R^{(1)}$, ao longo do tempo, nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.

(1) relação entre as quantidades anuais de carbono adicionadas e liberadas.

pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

novamente se tornar um. O comportamento da relação F/R sugerido por Janzen et al. (1998) é semelhante ao obtido neste Estudo para os sistemas simulados. O que Janzen et al. (1998) consideraram ação negativa coincidiu com os sistemas simulados em preparo convencional, os quais a relação F/R foi menor que um no início dos eventos e após um período de tempo tendeu a um (Figura 13). Ação positiva, segundo Janzen et al. (1998), coincidiu com o sistema *sd avmc* que teve a relação F/R maior que um no início dos eventos e após um período de tempo também tendeu a um (Figura 13). Assim como para avaliar qualidade do solo, os efeitos destas ações no estoque de carbono vão depender das quantidades envolvidas na relação F/R.

A grande diferença entre as análises do balanço e da relação F/R é que o balanço indica o ganho ou a perda líquida de energia e matéria do sistema, o que é crucial, mesmo que a diferença entre as quantidades adicionadas e liberadas seja pequena. Isto porquê se o sistema retém energia e matéria, a estrutura fica mais complexa, resultando maior número de propriedades emergentes, o que favorece o aumento do fluxo dentro do sistema. E, teoricamente, conduz o sistema a estado de ordem em nível superior. Mas, se por um lado o balanço demonstra o ganho ou perda líquida de energia e matéria do sistema, por outro lado, a magnitude deste ganho ou perda não é possível de ser analisado pelo balanço.

Observa-se na Tabela 3 que as maiores quantidades de carbono adicionadas e liberadas estão associadas aos sistemas de maior adição, independente do grau de revolvimento do solo. Estes resultados concordam com Duiker e Lal (2000) em que a maior quantidade de CO₂ liberada foi dos sistemas com maior quantidade de carbono adicionada. Este fato é devido à maior adição contribuir para o principal fator abiótico da atividade dos microrganismos, que é a fonte de energia e carbono. Maior disponibilidade de alimento, maior será a biomassa microbiana (Vargas e Scholles,

2000) e, conseqüentemente, o aumento na sua atividade, favorecendo a produção de CO₂ pelo sistema.

Entre os sistemas com mesmo tipo de culturas, o grau de revolvimento do solo exerceu efeito determinante na quantidade de carbono liberada. Aos 10 anos após o início dos eventos, a quantidade de carbono liberada no sistema de baixa adição em preparo convencional (*pc am*) foi 12% maior que a quantidade adicionada (Tabela 3), enquanto que em semeadura direta (*sd am*) esta diferença foi 4%. Para os sistemas de alta adição, em preparo convencional (*pc avmc*) a liberação de carbono foi 3% maior que a adição, e em semeadura direta (*sd avmc*) o processo inverteu, a adição foi 5% maior que a liberação (Tabela 3).

Nos sistemas de maior adição houve diferença nos balanços anuais entre os graus de revolvimento do solo (Figura 12 e Tabela 3). O *sd avmc* teve balanço positivo durante todo o período de simulação, o que acarretou em leve aumento nas quantidades adicionadas e liberadas ao longo do tempo (Tabela 3). Isto se deve, provavelmente, às propriedades emergentes que surgem em sistemas com alta adição e sem revolvimento do solo, as quais favorecem o aumento da produção de matéria vegetal e retenção desta energia e matéria adicionada ao longo do tempo, criando condições para retroalimentar o sistema. No sistema *pc avmc*, por ter balanço negativo durante todo o período simulado, o fluxo diminuiu em torno de 2 Mg de carbono ha⁻¹ (Tabela 3), pois o revolvimento do solo desestrutura o sistema, diminuindo a capacidade de reter a energia e matéria adicionada, além de perder a fração do sistema. Neste caso, as propriedades emergentes não são capazes de aumentar a produção de matéria vegetal.

Em torno de 95% do nitrogênio e do enxofre e entre 20 a 75% do fósforo na superfície dos solos são encontrados na matéria orgânica do solo (Duxbury et al., 1989), numa relação C:N:P:S em torno de 140:10:1,3:1,3 (Zech et al., 1997). Nos sistemas com balanço negativo, a liberação destes nutrientes associados à decomposição da matéria

orgânica do solo diminui o estoque dos mesmos no solo. Os dados de Amado et al. (2000) determinados no experimento que serviu de referência para o presente estudo suportam esta evidência. Eles observaram que os sistemas em semeadura direta e com as culturas de aveia+vica/milho+caupi (*sd avmc*) tiveram acúmulo superior em torno de 400 kg ha⁻¹ de nitrogênio no solo comparado ao sistema em preparo convencional com as culturas de aveia/milho (*pc am*).

Mas, independente de reter ou perder energia e matéria, os sistemas de maior adição e, por isto, os de maior fluxo, tiveram a maior quantidade de carbono liberada (Tabela 3). Nestes sistemas, a liberação de pequenas moléculas, que estão associadas à matéria orgânica do solo ou são produtos da decomposição da mesma, é elevada se compararmos com os sistemas de baixa adição. Face a este processo se torna fundamental a existência de plantas em fase de requerimento destes nutrientes para permitir que os mesmos permaneçam dentro do sistema. Mas, geralmente, em agroecossistemas, os processos de liberação e absorção de nutrientes são separados no tempo, resultando em baixa eficiência do uso de nutrientes (Sanchez et al., 1989). Agravado em sistemas com alto grau de revolvimento do solo, que aceleram a taxa de decomposição dos resíduos (Amado et al., 2000) e aumentam a velocidade do fluxo (Bayer et al., 2000b). Isto é particularmente crucial com nitrogênio, onde quantidades são perdidas por lixiviação, desnitrificação e volatilização da amônia, como a situação citada por Amado et al. (2000) descrita acima. Os autores constataram que sistemas com alta adição de resíduos em preparo convencional deixou de reter no solo cerca de 400 kg N ha⁻¹, indicando que, em função do revolvimento do solo, ocorreu perdas de nitrogênio para além das fronteiras do sistema alvo. Os sistemas com alta adição e com alto grau de revolvimento do solo, além de diminuir o estoque de carbono e nutrientes no próprio sistema, tem potencial para contaminar ecossistemas vizinhos.

Segundo Addiscott (1995), a liberação de pequenas moléculas como CO_2 , CH_4 , N_2O e NO_3^- , todas indesejáveis ambientalmente, compromete a sustentabilidade de um sistema de produção agrícola. Conforme a proposta de Addiscott (1995), neste trabalho o sistema de baixa adição e com maior grau de revolvimento do solo (*pc am*) seria o mais sustentável, pois liberou a menor quantidade de CO_2 e, provavelmente de NO_3^- (Tabela 3). Esta análise poderia ser válida sob determinado aspecto da sustentabilidade, onde sistemas que liberam a menor quantidade de compostos contaminam menos os agroecossistemas adjacentes. Mas, por outro lado, a capacidade produtiva deste sistema é muito baixa, afetando a sobrevivência social do agricultor sobre a terra. No experimento, que serviu de referência para este estudo, no décimo quarto ano após o início dos sistemas, o *pc am* produziu $1,25 \text{ Mg ha}^{-1}$ de grãos de milho, enquanto o sistema *sd avmc* produziu $5,90 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Lovato, 2001). Atualmente, o sistema *pc am* pode estar contaminando menos o ambiente, mas a produtividade do sistema é muito baixa, comprometendo pelo menos um dos cinco pilares da sustentabilidade: produtividade, segurança, proteção, viabilidade e aceitabilidade (Smyth e Dumanski, 1995).

Do ponto de vista deste trabalho, o sistema *sd avmc*, apesar de ter apresentado a maior quantidade de energia e matéria liberada, parece ser o mais sustentável, pois com balanço positivo, reteve carbono, retirando-o da atmosfera e aumentando a sua capacidade produtiva. Partindo da hipótese que sistemas que aumentam o fluxo de energia e matéria ao longo do tempo atingem estados de ordem em nível superior, onde as propriedades emergentes capacitam o sistema solo cumprir suas funções na natureza, o *sd avmc*, mesmo com maior liberação de pequenas moléculas, tem qualidade.

A avaliação de pequenas moléculas proposta por Addiscott (1995) pode ser relevante para algumas circunstâncias. Mas, a princípio, parece necessário analisar também o balanço entre as quantidades de pequenas moléculas adicionadas e liberadas,

pois sistemas que adicionam mais, liberam mais também e apenas por este aspecto não são insustentáveis, como é o caso do *sd avmc*. Sistemas com balanço negativo, que perdem a própria matéria, além de diminuir o seu estoque de carbono e nutrientes e, conseqüentemente, a sua capacidade produtiva, contaminam o ambiente. Desta forma, são insustentáveis, independente da quantidade liberada de pequenas moléculas.

Coleman et al. (1998) em concordância a Addiscott (1995) ainda propõem: *“...a produção agrícola deve buscar o estado estável do sistema, o qual seja mantido sem muito gasto de energia, e deve manter a capacidade do sistema de se auto-organizar, garantindo, desta forma, o potencial biológico. Um sistema com saída de muitas moléculas pequenas é inerentemente instável e se torna mais desordenado. Tal situação deve ser evitada”*.

Realmente os sistemas com grande fluxo são os mais instáveis, pois necessitam da manutenção do fluxo alto para garantir o nível de ordem atingido. A questão de ser mais desordenado pode ser vista pelo aspecto da produção de entropia. Sistemas com maior fluxo produzem maior entropia, mas a entropia é fonte geradora de ordem nos sistemas abertos. A princípio pode-se afirmar que a situação de instabilidade deve ser mantida e até almejada para sistemas em produção agrícola. É justo a instabilidade pelo fluxo alto que vai dar condições para o sistema se auto-organizar e aumentar o seu nível de ordem, caracterizado pela maior quantidade de matéria retida, o que garante o potencial biológico.

A hipótese deste Estudo de que sistema solo com quantidade de energia e matéria adicionada maior que a quantidade liberada (*sd avmc*) aumenta o fluxo que passa pelo mesmo ao longo do tempo foi confirmada. Mas neste Estudo também se observou que a magnitude do fluxo foi mais dependente da quantidade de energia e matéria adicionada, e que a relação das quantidades adicionadas e liberadas interferiu

na capacidade do sistema reter ou perder energia e matéria além das suas fronteiras. Provavelmente, este comportamento está relacionado com os estados de ordem atingidos. Esta análise será feita no Estudo 2, onde será testada a hipótese de que o aumento do fluxo conduz o sistema a estado de ordem em nível superior.

5. ESTUDO 2. ESTADOS DE ORDEM DE SISTEMAS SOLO

Este estudo foi conduzido para testar a hipótese 2: “Sistemas solo que aumentam o fluxo de energia e matéria, ao longo do tempo, se auto-organizam em estruturas sucessivamente mais complexas, elevando o nível de ordem em relação ao seu estado precedente”. E teve como objetivo analisar o comportamento dos estados de ordem de sistemas solo em produção agrícola.

Os estados de ordem do sistema solo são representados pelas diferentes classes de diâmetro de agregados, nas quais os componentes se auto-organizam, conforme teoria apresentada no item 3.2.5. Estados de Ordem do Sistema Solo.

A organização pode estar em nível de ordem alto ou baixo (Figura 8). O nível alto se caracteriza pela presença de estruturas mais complexas e diversificadas, representadas pela maior proporção de macroagregados, e maior quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos. O nível baixo se caracteriza pela presença de estruturas mais simples, representadas pela maior proporção de microagregados, e menor quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos.

5.1. Materiais e Métodos

Para testar a hipótese e atingir o objetivo proposto, determinou-se a distribuição de agregados em classes de diâmetro e a quantidade de carbono dos sistemas solo, conduzidos em experimento na Estação Experimental Agronômica da

UFRGS, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1. Outros sistemas solo também foram avaliados, a fim de analisar diferenças na contribuição dos subsistemas plantas e mineral para os estados de ordem.

5.1.1. Local e Caracterização das Áreas Experimentais

Os sistemas solo utilizados neste estudo são áreas de experimentos e de campo nativo na Estação Experimental Agronômica da UFRGS no município de Eldorado do Sul, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, sob dois diferentes tipos de solos: Argissolo Vermelho Distrófico típico (PVd) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd). E, também, em área de campo nativo no município de Guabiju, na região fisiográfica do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul, sob Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf).

Na Tabela 4 constam as características dos tipos de solo avaliados.

Para melhor descrever os sistemas avaliados, estes foram separados por tipo de solo e por área experimental.

TABELA 4. Características dos solos avaliados no Estudo 2.

Tipo de solo	Material origem	Areia	g kg ⁻¹			Argilomineral dominante	Óxidos de ferro g Fe kg ⁻¹
			Silte	Argila			
PVd	granito	525	250	225 ⁽¹⁾	caulinita ⁽⁴⁾	79 ⁽⁷⁾	
PVAd	granito	600	230	170 ⁽²⁾	caulinita ⁽⁵⁾	53 ⁽⁸⁾	
LVdf	basalto	60	240	700 ⁽³⁾	caulinita ⁽⁶⁾	155 ⁽⁹⁾	

(1) Média dos dados obtidos por Silva e Mielniczuk (1997) e Fernandes (2000).

(2) Streck, 1999.

(3) (9) Brasil, 1973.

(4) (5) (7) (8) Espírito Santo, 1988.

5.1.1.1. PVd – área experimental conduzida desde 1983.

Em área originalmente de campo nativo, as culturas de girassol e colza foram cultivadas, entre o período de 1970 à 1982, com preparo de solo por enxada rotativa, o que causou intensa degradação física do solo (Medeiros, 1985).

Em 1983, após correção da acidez e da fertilidade do solo, foi instalado um experimento para avaliar efeitos de diferentes seqüências de culturas em semeadura direta na recuperação do solo. Os tratamentos recebem 75 kg de P_2O_5 $ha^{-1}ano^{-1}$ e 45 kg K_2O $ha^{-1}ano^{-1}$ na semeadura do milho. Em 1998, foram aplicados em torno de 2 Mg de calcário ha^{-1} em superfície. Detalhes do procedimento experimental estão descritos em Medeiros (1985), Bragagnolo (1986), Teixeira (1988), Testa (1989), Pavinato (1993), Burle (1995) e Fernandes (1998).

Neste trabalho, foram estudadas as seqüências de culturas descritas na Tabela 5.

TABELA 5. Sistemas solo na área experimental em solo PVd desde 1983, Eldorado do Sul.

Denominação dos Sistemas	Culturas	
	Inverno	Verão
lablab/m	lablab (<i>Lablab purpureus</i> (L.) Sweet)	lablab e milho (<i>Zea mays</i> L.)
guandu/m	guandu (<i>Cajanus cajan</i> (L.) Milsp)	guandu e milho
descoberto ⁽¹⁾⁽²⁾	---	--- (milho)
pangola ⁽²⁾	pangola (<i>Digitaria decumbens</i> Stent)	pangola (milho)

⁽¹⁾ Mantido sem plantas por preparo de solo até o ano de 1988, após pela aplicação de herbicidas.

⁽²⁾ Cultiva-se milho a cada 5 anos: 1º cultivo 1988/89, 2º cultivo 1993/94, 3º cultivo 1998/99.

5.1.1.2. PVd – área experimental conduzida desde 1985.

Em área originalmente de campo nativo, as culturas de girassol e colza foram cultivadas, entre o período de 1970 à 1982, com preparo de solo por enxada rotativa, o que causou intensa degradação física do solo (Medeiros, 1985).

A partir de 1985, após correção da acidez e da fertilidade do solo, foi instalado um experimento para avaliar os efeitos de sistemas de preparo e de culturas na

recuperação do solo. Os tratamentos recebem 75 kg de P_2O_5 $ha^{-1}ano^{-1}$ e 45 kg K_2O $ha^{-1}ano^{-1}$ na semeadura do milho. Durante o tempo de experimento, por três vezes foram aplicados em torno de 2 Mg de calcário ha^{-1} em superfície. Detalhes do procedimento experimental estão descritos em Freitas (1988), Rosso (1989), Mello (1991), Bayer (1992) e Amado (1997).

Neste trabalho foram estudados os sistemas descritos na Tabela 6.

TABELA 6. Sistemas solo na área experimental em solo PVd desde 1985, Eldorado do Sul.

Denominação dos Sistemas	Preparo do Solo	Culturas	
		Inverno	Verão
pc am	convencional ⁽¹⁾	aveia (<i>Avena strigosa</i> Schreb)	milho
pc avmc	convencional	aveia e vica (<i>Vicia sativa</i> L.)	milho e caupi (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp)
sd am	semeadura direta ⁽²⁾	aveia	milho
sd avmc	semeadura direta	aveia e vica	milho e caupi

⁽¹⁾ Uma aração e duas gradagens antes da semeadura da cultura de verão e semeadura direta da cultura de inverno após rolagem com rolo-faca da cultura de verão.

⁽²⁾ Semeadura direta após rolagem com rolo-faca da cultura anterior.

5.1.1.3. PVd – área experimental conduzida desde 1970.

Nesta área, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da UFRGS, desde 1970 estão sendo cultivadas diversas culturas para avaliação de melhoramento genético de plantas. O preparo do solo, caracterizado por uma aração mais duas gradagens em duas épocas do ano antes da semeadura das culturas de verão e de inverno, foi empregado até 1995. A partir desta data, o cultivo das culturas vem sendo conduzido em semeadura direta.

Denominou-se este sistema de *lavoura*.

5.1.1.4. PVd – Campo Nativo

Escolheu-se três áreas de cota equivalente aos sistemas descritos acima (todos os sistemas estão em cota equivalente) para representar a situação de vegetação nativa deste tipo de solo.

A cobertura vegetal predominante é de campos mistos, bastante infestada por barba-de-bode (*Aristida Pallens*), com pastejo animal moderado.

Denominou-se este sistema de *CN PVd*.

5.1.1.5. PVAd – área experimental conduzida desde 1975

Desde 1975, esta área foi utilizada para vários experimentos de erosão, sendo que a adição de resíduos foi muito baixa e a ação do processo erosivo foi muito alta, o que acarretou em grande perda de solo neste período. Os procedimentos experimentais estão descritos em Vieira (1977), Cassol et al. (1981), Lopes (1984), Amado (1985), Bertol (1986), Carvalho (1986), Levien (1988), Alves (1991), Streck (1999).

Em 1991 a área teve a acidez e a fertilidade do solo corrigidas e foram cultivadas as culturas de aveia e milho até 1995. Em maio de 1995, após a colheita do milho, todos os resíduos culturais foram retirados, e, entre maio e dezembro de 1995, o solo foi revolvido várias vezes com escarificação e gradagem. As plantas invasoras foram controladas por herbicidas e por capina manual. De dezembro de 1995 à maio de 1998, período em que ocorreram testes de chuva simulada, o preparo de solo com uma aração e duas gradagens foi realizado seis vezes. E a partir de então, este sistema foi mantido em processo de reconsolidação natural.

Denominou-se este sistema de *sem adição*.

5.1.1.6. PVAd – Campo Nativo

Escolheu-se três áreas de cota equivalente ao sistema *sem adição*, para representar a situação de vegetação nativa deste tipo de solo.

A cobertura vegetal predominante é de campos mistos, bastante infestada por barba-de-bode, com pastejo animal moderado.

Denominou-se este sistema de *CN PVAd*.

5.1.1.7. LVdf – Campo Nativo

A área escolhida foi de beira de estrada, onde a vegetação predominante é de campos de altitude, infestado por barba-de-bode.

Denominou-se este sistema de *CN LVdf*.

Na Tabela 7 consta o resumo da caracterização dos sistemas solo avaliados.

5.1.2. Determinação dos Agregados

A metodologia desta determinação foi conduzida com o propósito de avaliar a quantidade de solo agregado em cada sistema.

Amostras indeformadas de solo dos sistemas solo (Tabela 7) foram coletadas na camada de 0 a 7,5 cm de profundidade, em setembro de 1999 e em setembro de 2000, com exceção do sistema *CN LVdf* em que a amostragem foi realizada em setembro de 2000.

As amostras foram destorroadas levemente com os dedos, respeitando os pontos de fraqueza da massa de solo, a fim de obter agregados inferiores à 9,51 mm de diâmetro, utilizando para isto peneira com esta malha. Estas amostras foram secas ao ar por 72 horas e armazenadas em recipientes plásticos.

TABELA 7. Sistemas solo avaliados no Estudo 2.

Denominação dos Sistemas Solo	Tipos de solo		Tipos de culturas		Revolvimento do solo	Tempo de experimento no ano 2000 (anos)
	inverno	verão	inverno	verão		
<i>CN PVd</i>	PVd	campo nativo	campo nativo	campo nativo	sem	-
<i>pc am</i>	PVd	aveia	milho	milho	lavração	15
<i>pc avmc</i>	PVd	aveia e vica	milho e caupi	milho e caupi	lavração	15
<i>sd am</i>	PVd	aveia	milho	milho	semeadura direta	15
<i>sd avmc</i>	PVd	aveia e vica	milho e caupi	milho e caupi	semeadura direta	15
<i>lablab/m</i>	PVd	lablab	milho e lablab	milho e lablab	semeadura direta	17
<i>guandu/m</i>	PVd	guandu	milho e guandu	milho e guandu	semeadura com saraquá	17
<i>descoberto</i>	PVd	sem ⁽¹⁾	sem	sem	sem	17
<i>lavoura</i>	PVd	diversas	diversas	diversas	lavração ⁽²⁾	30
<i>pangola</i>	PVd	pangola	pangola	pangola	sem	16
<i>CN PVAd</i>	PVAd	campo nativo	campo nativo	campo nativo	sem	-
<i>sem adição</i>	PVAd	sem	sem	sem	lavração ⁽³⁾	25
<i>CN LVdf</i>	LVdf	campo nativo	campo nativo	campo nativo	sem	-

(1) Mantido sem plantas por preparo de solo até o ano de 1988, após pela aplicação de herbicidas.

(2) Sem revolvimento do solo nos últimos 5 anos.

(3) Última lavração em maio de 1998.

O processo de determinação dos agregados consistiu em três etapas: peneiragem via úmida, peneiragem via seca dos agregados de cada classe da etapa anterior e separação das partículas simples. Os dados obtidos em cada etapa nos dois anos de amostragem estão apresentados nos Apêndices 7 e 8.

5.1.2.1. Peneiragem Via Úmida

Uma subamostra, de aproximadamente 50 g, de solo seco ao ar foi colocada em funil confeccionado com papel filtro e acoplado a uma base, também de papel filtro, inserida em lata de alumínio com uma lâmina de água, para permitir umedecimento do solo por capilaridade (Figura 14).

Após 16 horas de umedecimento, as amostras foram transferidas para tubo plástico de 21 cm de comprimento e 9,5 cm de diâmetro, com tampa, contendo 500 mL de água potável, e agitadas em agitador rotativo por 2 minutos em 16 rpm.

Em seguida, o conteúdo de cada tubo foi transferido para um conjunto de peneiras de 4,76; 2,00; 0,25 e 0,053 mm de diâmetro de malha, acoplado em agitador de oscilação vertical e inserido em um balde contendo água, em nível suficiente para cobrir a metade da parede da peneira de 4,76 mm, quando esta estava na posição mais alta no processo de agitação. As amostras foram agitadas verticalmente por 15 minutos a 42 oscilações por minuto.

Os agregados retidos em cada peneira foram secos à 105°C por 24 horas e armazenados em recipientes plásticos de 40 mL. Os agregados e partículas de tamanho menor que 0,053 mm, foram obtidos adicionando à água do balde 25 mL de alúmen de potássio à 5%, a fim de precipitar os agregados e partículas dispersas na água. Após 16 horas de sedimentação, a água límpida foi retirada com ajuda de um sifão e os agregados e partículas depositados no fundo do balde foram secos à 105°C por 24 horas e armazenados.

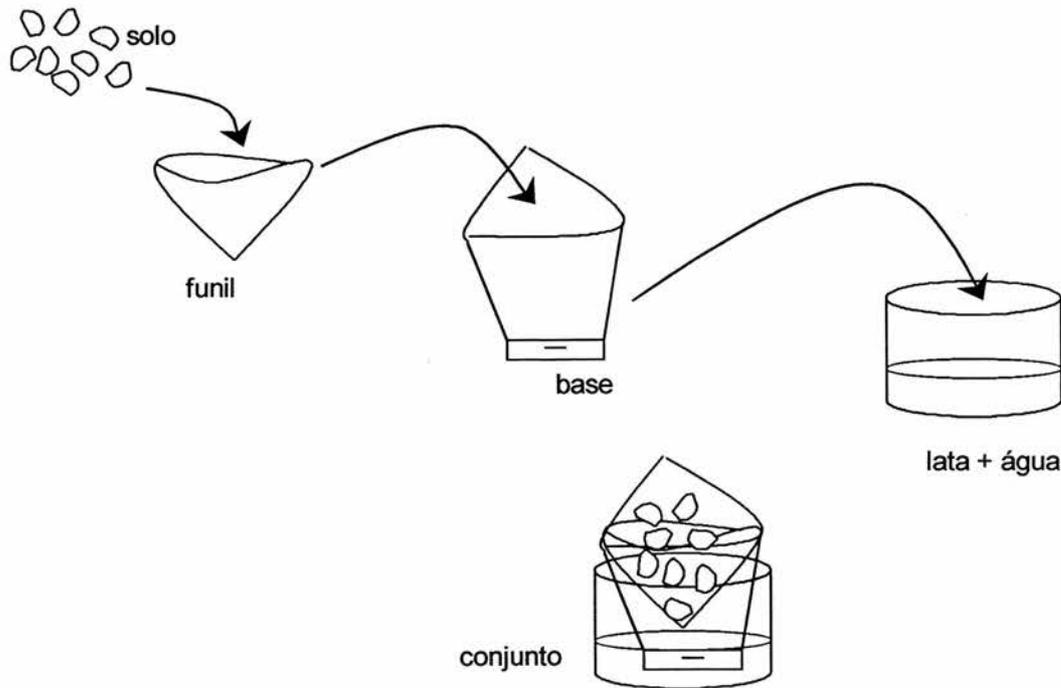


FIGURA 14. Processo de umedecimento das amostras para determinação dos agregados por peneiragem via úmida.

5.1.2.2. Peneiragem Via Seca

Após a peneiragem via úmida, houve separação de partículas dos agregados em função do manuseio das amostras. Considerou-se que a separação das partículas ocorreu devido à frágil ligação entre as partes. Com o objetivo de determinar o peso real de agregados em cada classe, realizou-se a peneiragem via seca.

O processo consistiu em passar os agregados secos das classes $> 4,76$; $4,76-2,00$ e $2,00-0,25$ mm, obtidos na peneiragem via úmida, num conjunto de peneiras com malha de $4,76$; $2,00$ e $0,25$ mm de diâmetro e agitá-lo com as mãos. Os agregados menores que $0,25$ mm foram transferidos para classe $0,25-0,053$ mm. Após a peneiragem, os agregados retidos em cada peneira foram pesados e armazenados.

5.1.2.3. Separação das Partículas Simples

A separação das partículas simples teve a finalidade de obter a massa de solo que o sistema foi capaz de agregar. Para isto, considerou-se partícula simples toda aquela partícula de mineral quartzo ou concreções de óxidos, que não estava associada a partículas de argilominerais e óxidos, formando agregados.

O processo de separação foi distinto para cada classe.

5.1.2.3.1. Classe > 4,76 mm

Com auxílio de uma lupa com aumento de 2 vezes e manuseio das amostras com agulha de injeção, toda amostra foi separada, obtendo-se os pesos de agregados e de partículas simples.

5.1.2.3.2. Classe 4,76-2,00 mm

Utilizou-se lupa com aumento de 10 vezes. Toda amostra foi separada e obteve-se os pesos de agregados e de partículas simples.

5.1.2.3.3. Classe de 2,00-0,25 mm

Foi necessário dividir esta classe em duas subclasses, devido à grande variação de tamanho das partículas. A divisão foi realizada através da peneiragem em malha de 1,00 mm de diâmetro, obtendo-se duas subclasses de agregados: 2,00-1,00 e 1,00-0,25 mm. Ambas subclasses foram pesadas antes da separação das partículas simples.

O processo de separação foi feito individualmente para cada subclasse. Para a subclasse 2,00-1,00 mm utilizou-se lupa com aumento de 10 vezes e a separação foi realizada numa porção da amostra, obtendo-se a proporção de agregados e de partículas simples da subclasse. Para subclasse 1,00-0,25 mm o aumento na lupa foi de 20 vezes,

e, da mesma forma, a separação foi realizada numa porção da amostra, obtendo a proporção de agregados e de partículas simples da subclasse.

A partir das proporções, o peso dos agregados e das partículas simples de cada subclasse foi calculado com base nos pesos obtidos após a divisão das mesmas. O peso dos agregados e das partículas simples da classe 2,00-0,25 mm foi obtido pela soma dos pesos calculados das duas subclasses.

5.1.2.3.4. Classe 0,25-0,053 mm

Uma porção da amostra foi colocada sobre papel milimetrado, e as frequências de agregados e de partículas simples foram contadas num campo de 2 mm^2 , com auxílio de uma lupa com aumento de 63 vezes. Considerou-se a mesma densidade para agregados e partículas simples, e, a partir da frequência, obteve-se a proporção de ambos na classe. O peso dos agregados e das partículas simples da classe foi calculado através da proporção com base no peso obtido após a peneiragem via seca.

5.1.2.3.5. Classe $< 0,053 \text{ mm}$

Considerou-se que partículas do tamanho silte ($> 0,002 \text{ mm}$) estariam isoladas, caracterizando as partículas simples e as demais ($< 0,002 \text{ mm}$: argila grossa, fina e muito fina) associadas, formando agregados. Para isto, a amostra foi dispersa e a fração silte foi separada.

Para dispersão, utilizou-se aproximadamente 1,8 g de solo, em função de ser o menor peso obtido em uma amostra desta classe no processo de peneiragem via úmida.

O processo de dispersão consistiu na adição de 1 mL de NaOH 1 mol L^{-1} e 10 mL de água destilada em 1,8 g de solo. Esta suspensão foi agitada horizontalmente por 1 hora. Em seguida, transferiu-se o conteúdo para uma proveta de 250 mL e o volume completado até o aferimento com água potável. Agitou-se a suspensão por 30 s com um

bastão de arame, tendo uma tampa plástica plana na sua extremidade inferior com diâmetro um pouco menor que o da proveta. Após 40 s do término da agitação, retirou-se a suspensão até 1 cm da base da proveta, com ajuda de um sifão. Repetiu-se a operação: o volume da proveta foi completado até o aferimento com água potável, a suspensão foi agitada por 30 s, e após 40 s coletou-se a suspensão até 1 cm da base da proveta. A suspensão, que permaneceu na proveta, foi transferida para um cadinho e seca à 105 °C. Após 24 horas, obteve-se o peso de silte, que foi considerado o peso das partículas simples.

Com o peso de silte, calculou-se a proporção das partículas simples na amostra de 1,8 g. A partir desta proporção calculou-se o peso dos agregados e das partículas simples da classe com base no peso obtido após a peneiragem via úmida.

5.1.2.4. Análise Estatística

Para o estudo dos agregados foi utilizada a análise de variância. O delineamento experimental foi parcelas sub subdivididas e as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey à 5% de significância.

A análise foi feita em todas as classes de agregados entre sistemas solo sobre o mesmo tipo de solo e entre tipos de solo com a respectiva vegetação nativa. Os resultados estão apresentados nos Apêndices 9, 10 e 11.

5.1.3. Determinação do Carbono Total no Solo

Carbono total no solo foi determinado nas amostras secas ao ar dos sistemas solo que constam na Tabela 7 pelo método Walkley-Black descrito em Tedesco et al. (1995), utilizando, aproximadamente, 1,000 g de solo, com exceção do *CN LVdf* que foi 0,500 g. Os dados nos dois anos de amostragem estão apresentados no Apêndice 12.

5.1.3.1. Análise Estatística

O carbono total no solo foi analisado pela variância. Utilizou-se delineamento experimental de parcelas subdivididas e as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey à 5% de significância.

A análise foi feita entre sistemas solo sobre o mesmo tipo de solo e entre tipos de solo com a respectiva vegetação nativa. Os resultados estão apresentados nos Apêndices 13, 14 e 15.

Os dados estão apresentados por quantidade de solo agregado na camada de 0 a 7,5 cm do perfil e quantidade de carbono no solo agregado. Para estes cálculos, utilizou-se os valores de densidade do solo apresentadas em Bayer (1996) e Streck (1999), as quais constam no Apêndice 16.

5.2. Resultados e Discussão

Para analisar melhor os resultados, a discussão foi dividida em três conjuntos de sistemas: sistemas solo cujos fluxos foram simulados no Estudo 1, sistemas solos conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo e sistemas solo em vegetação de campo nativo.

5.2.1. Sistemas Solo cujos Fluxos foram Simulados no Estudo 1

Na Figura 15 consta a distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solos cujos fluxos foram simulados no Estudo 1. Os sistemas com mesmo grau de revolvimento do solo apresentaram comportamento semelhante e a magnitude do fluxo de energia e matéria não interferiu na distribuição das classes.

O revolvimento do solo exerce dois efeitos determinantes que explicam os resultados obtidos. Um deles é a quebra mecânica dos agregados maiores, fazendo com que não haja concentração de agregados nas classes maiores que 2 mm. Durante o

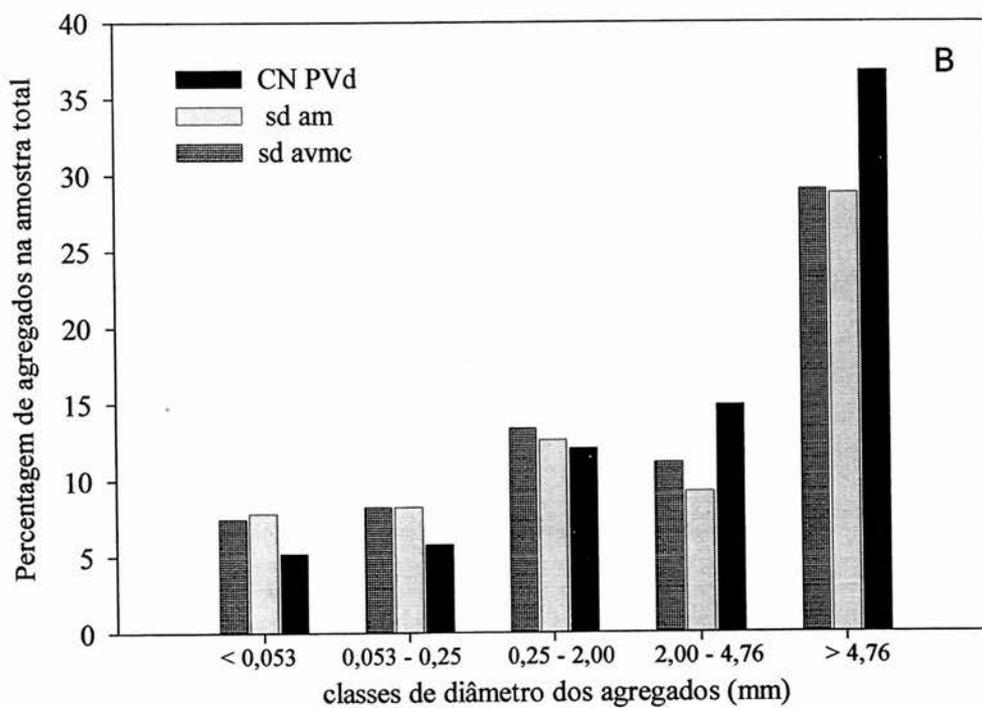
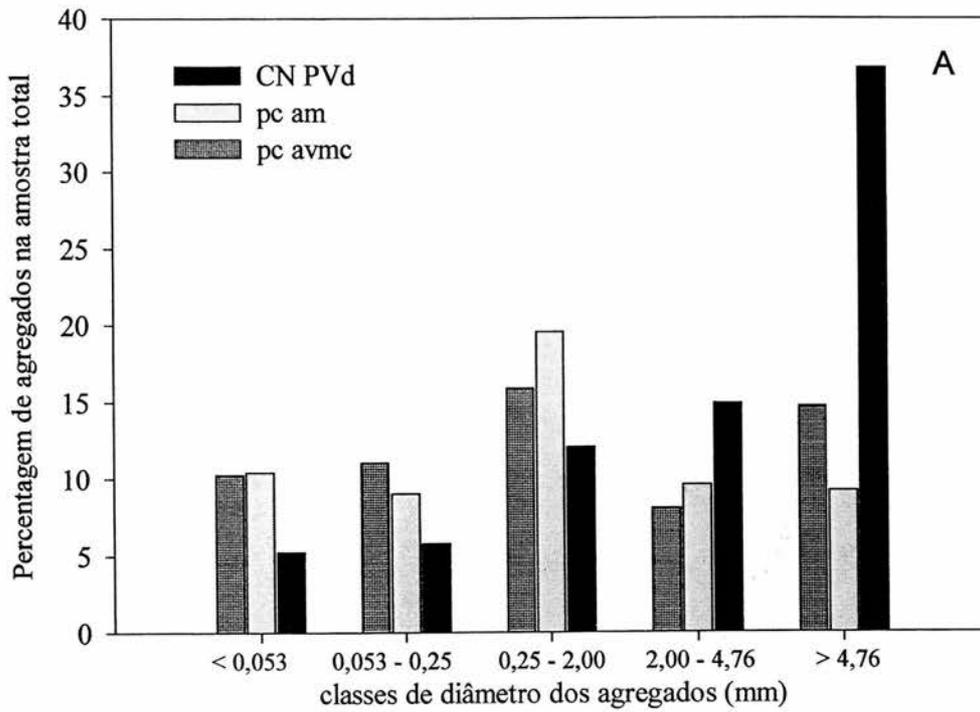


FIGURA 15. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVd, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1. Sistemas em preparo convencional (A) e sistemas em semeadura direta (B). CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

período vegetativo das plantas ocorre a formação de macroagregados pela ação do sistema radicular em desenvolvimento, proliferação de hifas (Jastrow,1996), e pela liberação de exsudatos radiculares, mas o revolvimento do solo quebra estas estruturas maiores recentes, reduzindo o diâmetro dos agregados. Desta forma, o revolvimento rompe a seqüência de fenômenos que conduzem o sistema à ordenação em macroagregados (Figura 8).

O outro efeito do revolvimento é a aceleração da decomposição da matéria orgânica do solo, pelo aumento da aeração do sistema, exposição da matéria orgânica protegida fisicamente e aumento da área de contato dos resíduos, facilitando o consumo pela microbiota decompositora. Como a energia e a matéria são a fonte geradora de ordem, pois a matéria orgânica participa do processo de agregação do solo em todas as classes, desde a floculação das partículas de argilominerais até os macroagregados, inclusive sendo núcleo de macroagregados, a perda deste agente ligante e formador de agregados pelo revolvimento do solo compromete o processo de ordenação do sistema. Portanto, todo o processo de ordenação pelo alto fluxo de energia e matéria é mascarado por uma ação externa ao sistema, que é a prática do revolvimento do solo.

O maior fluxo de energia e matéria do *pc avmc* em relação ao *pc am* não foi suficiente para superar a ação do revolvimento do solo e conduzir o sistema à formação de estruturas mais complexas (Figura 15A). Houve pequenas diferenças nas classes 0,25 – 2,00 e > 4,76 mm, mostrando tendência à maior ordenação para o *pc avmc*, mas mesmo assim está muito aquém dos sistemas em semeadura direta (Figura 15B). Nestes sistemas, a seqüência de fenômenos não foi interrompida, e o sistema teve condições de se auto-organizar em estruturas maiores.

A diferença entre graus de revolvimento do solo, além de ter influenciado a distribuição dos agregados nas classes de diâmetro, refletiu-se, também, na quantidade de solo agregado (Figura 16). Os sistemas com baixo grau de revolvimento tiveram

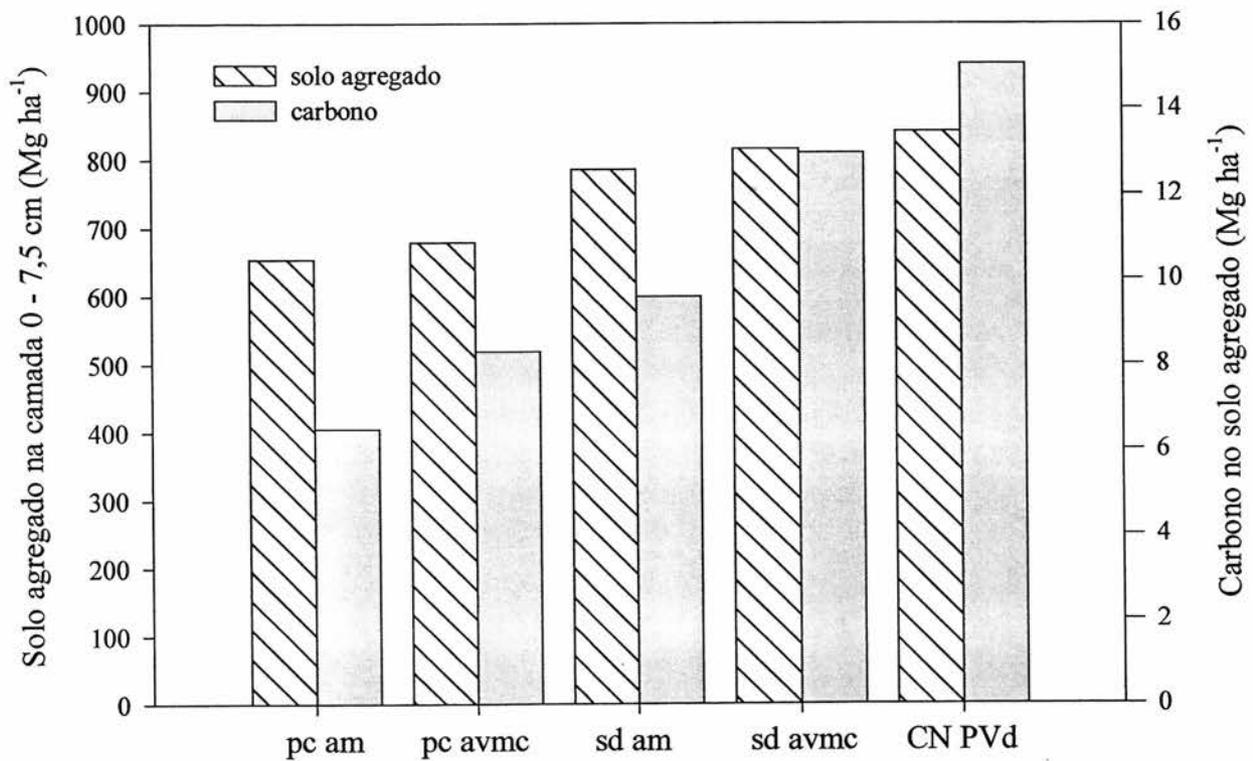


FIGURA 16. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas solo sobre PVd, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1.

CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

capacidade de agregar a maior massa de solo, equivalendo-se ao sistema *CN PVd*. Em 15 anos, um sistema com baixo grau de revolvimento, o qual ocorre apenas na linha das culturas por ocasião da semeadura direta nos meses de abril e outubro, foi capaz de organizar seus componentes em agregados. O que não ocorreu com os sistemas em preparo convencional, nestes a massa de solo agregado foi menor e, conseqüentemente, a quantidade de partículas simples foi 24% maior. Os sistemas em semeadura direta além de apresentarem a maior massa de solo agregado, essa massa foi composta principalmente por agregados com diâmetro maior que 2 mm (Figura 15B), evidenciando a estrutura complexa e diversificada do sistema, e, desta forma, teve capacidade de reter maior quantidade de energia e matéria adicionadas na forma de compostos orgânicos (Figura 16). A massa de solo agregado dos sistemas em preparo convencional consistiu de agregados com diâmetro menor que 2 mm (Figura 15A), os quais possuem estrutura mais simples, com menor capacidade de reter a energia e matéria adicionadas. Por este motivo, mesmo com quantidade adicionada de carbono equivalente aos sistemas em semeadura direta (Tabela 8), os sistemas em preparo convencional tiveram menor quantidade retida de carbono (Figura 16).

TABELA 8. Quantidade de carbono, em Mg ha^{-1} , adicionada anualmente pelas plantas nos sistemas solo cujos fluxos foram simulados no Estudo 1. Dados observados por Lovato (2001).

Sistemas Solo	Carbono adicionado pelas plantas
	$\text{Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$
<i>CN PVd</i> ⁽¹⁾	-
<i>pc am</i>	4,1
<i>pc avmc</i>	7,2
<i>sd am</i>	4,1
<i>sd avmc</i>	7,2

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

Comparando os sistemas com diferentes tipos de culturas dentro do mesmo grau de revolvimento do solo, a diferença na quantidade de carbono no sistema entre os tipos de culturas quando em preparo convencional foi de $1,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, e quando em semeadura direta foi de $3,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 16). A maior diferença para os sistemas em semeadura direta evidencia que a estrutura mais complexa destes sistemas tende a ter maior capacidade de reter energia e matéria, quando o fluxo aumenta.

Analisando o comportamento do fluxo (Estudo 1) e os estados de ordem (Figura 15), a expectativa era de que houvesse diferença na ordenação entre os sistemas *sd am* e *sd avmc*, em função dos balanços entre as quantidades adicionadas e liberadas de carbono analisadas no Estudo 1. O sistema *sd am* teve balanço negativo em, praticamente, todo período simulado, mas a distribuição dos agregados nas classes de diâmetro foi igual ao sistema *sd avmc* com balanço positivo durante toda simulação. O balanço negativo indica perda de energia e matéria do sistema, o que compromete a ordenação em níveis mais altos. Balanço positivo indica retenção de energia e matéria no sistema, dando condições para o sistema formar estruturas mais complexas e diversificadas e, com isto, avançar em nível de ordem. Existe diferença quanto ao período de análise dos fluxos e dos estados de ordem. Os fluxos foram analisados por simulação num longo tempo. A distribuição dos agregados nas classes de diâmetro foi analisada pontualmente aos 15 anos dos sistemas. O que pode estar ocorrendo é que o sistema *sd am*, com a quantidade adicionada de carbono até o momento foi capaz de conduzir o sistema para a ordenação atual. Como este sistema, pela simulação, diminui a adição de carbono no tempo (Figura 9A) e tem balanço negativo, o comportamento do *sd am* pode alterar, diminuindo a proporção de agregados com diâmetro maior que 2 mm. O que não ocorreria com o *sd avmc*, que mantém a adição (Figura 9A) e o balanço positivo, podendo aumentar a proporção de macroagregados. Com isto estes sistemas

podem distanciar em ordenação e em quantidade retida de energia e matéria ao longo do tempo. Deve-se considerar, também, que o método utilizado para determinar as classes de diâmetro dos agregados pode não ter sido eficiente para demonstrar as diferenças entre os sistemas.

Os níveis de ordem dos sistemas são relativos à ordenação dos componentes nas diferentes classes de diâmetro dos agregados e à quantidade retida de energia e matéria. Elaborou-se um valor para os níveis de ordem, a fim de categorizar os sistemas. Para isto, os parâmetros escolhidos foram a percentagem de agregados nas classes de diâmetro maiores que 2 mm e o carbono total no solo, em $\text{g } 100\text{g}^{-1}$. Utilizou-se as unidades maiores que 2 mm devido à estrutura desta classe ser complexa e diversificada, pois é composta por argilominerais, óxidos, quartzo, microrganismos, hifas, raízes, partes do tecido vegetal (MOP) e coprólitos de macrorganismos. O carbono total em percentagem foi utilizado porque este representa a quantidade de energia e matéria que o sistema foi capaz de reter. Adotou-se o sistema campo nativo como referência. Sendo assim, o *CN Pvd* teve valor 10 para ambos os parâmetros. O nível de ordem foi obtido pela multiplicação dos valores relativos ao *CN Pvd* de cada parâmetro. A escolha pelo produto dos valores relativos para determinar o nível de ordem foi baseada em propostas de indicadores de qualidade do solo, que são obtidos pela multiplicação de atributos do solo (Lal, 1993; Doran e Parkin, 1994; Larson e Pierce, 1994). Os níveis de ordem estão representados na Figura 17 e os valores relativos constam na Tabela 9.

Os dados da Figura 17 possibilitam observar que houve um aumento no nível de ordem à medida que aumentou a adição de energia e matéria e diminuiu o revolvimento do solo. Desta forma, pode-se inferir que o aumento no fluxo conduz o sistema para nível de ordem alto, e o não revolvimento impede que as estruturas formadas, em função do fluxo, sejam quebradas.

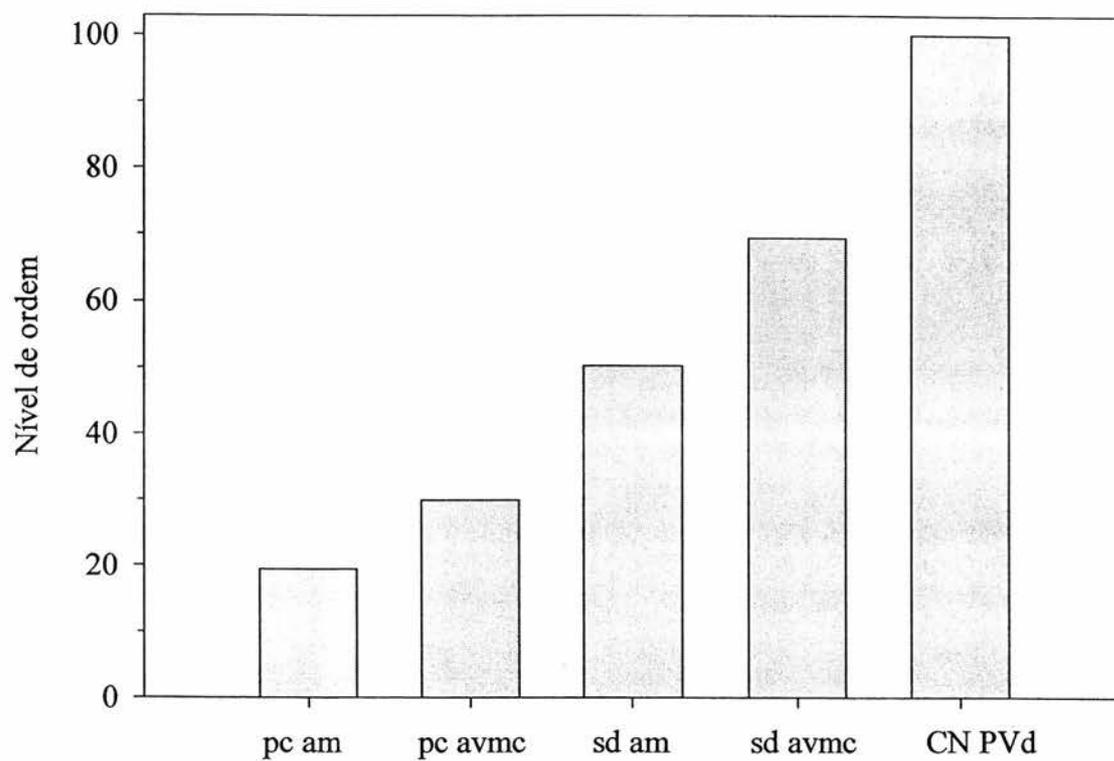


FIGURA 17. Níveis de ordem dos sistemas solo sobre PVd, cujos fluxos foram simulados no Estudo 1.

CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

TABELA 9. Valor relativo dos sistemas ao campo nativo correspondente quanto à quantidade de carbono total no solo e à proporção de agregados > 2mm, e o nível de ordem dos sistemas solo cujos fluxos foram simulados no Estudo 1.

Sistemas Solo	Valor Relativo carbono total (VR Ct)	Valor Relativo agregados >2mm (VR agr>2)	Nível de Ordem ⁽¹⁾
<i>CN PVd</i> ⁽²⁾	10,0	10,0	100,0
<i>pc am</i>	5,4	3,6	19,4
<i>pc avmc</i>	6,8	4,4	29,9
<i>sd am</i>	6,8	7,4	50,3
<i>sd avmc</i>	8,9	7,8	69,4

⁽¹⁾ Nível de Ordem = (VR Ct * VR agr>2)

⁽²⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional, sd = semeadura direta, a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

O *pc am* com baixa adição de energia e matéria e com alto grau de revolvimento do solo teve o mais baixo nível de ordem. A pouca adição promoveu um fluxo baixo e conduziu à auto-organização em nível baixo. O aumento no fluxo representado pelo sistema *pc avmc* promoveu a organização dos componentes do sistema em estruturas maiores com maior retenção de energia e matéria, conduzindo à nível de ordem mais elevado. *Quanto mais aglomerados*

O *pc avmc* teve nível de ordem menor que o *sd am*. O maior fluxo do *pc avmc* pode ter conduzido o sistema a se auto-organizar em estruturas mais complexas, mas o revolvimento quebrou-as. O *sd am*, mesmo com menor fluxo, se auto-organizou em um estado de ordem que não foi rompido pelo revolvimento, e com isto, conduziu o sistema à nível de ordem maior. Se analisarmos os valores relativos ao *CN PVd* desses sistemas (Tabela 9), ambos possuem a mesma concentração de carbono, portanto, o que determinou o nível de ordem foi a quantidade de solo agregado em unidades maiores que 2 mm, que foi diretamente influenciada pelo revolvimento. O *sd am*, que manteve os agregados maiores que 2 mm, teve menor quantidade adicionada de carbono, assemelhando-se ao *pc avmc* em VRCt com o dobro desta quantidade (Tabela 8).

Este comportamento pode estar relacionado com a velocidade de passagem do fluxo de energia e matéria. Neste mesmo experimento, Bayer et al. (2000b) determinaram a velocidade de passagem do fluxo, através do coeficiente de decomposição do carbono orgânico do solo (k_2), para os sistemas em semeadura direta e em preparo convencional, os valores foram de 0,054 e 0,029 ao ano, respectivamente. Isto significa que nos sistemas em semeadura direta, o carbono adicionado interage com os componentes do sistema, formando agregados, dificultando o consumo pelos microrganismos, o que resulta num tempo de meia vida de 24 anos. Ao contrário do preparo convencional, onde há quebra dos agregados e exposição do carbono, facilitando o consumo e resultando num tempo de meia vida de 13 anos. Como o carbono orgânico é fonte geradora de ordem, quando o seu tempo de permanência foi maior, como foi o caso do *sd am*, o sistema teve capacidade de formar estruturas mais complexas, aumentando o nível de ordem. Nos sistemas com maior grau de revolvimento, com elevado k_2 , como foi o caso do *pc avmc*, o carbono permaneceu pouco tempo, o que não favoreceu a formação de estruturas mais complexas. Portanto, a velocidade de passagem do fluxo pode até ser um fator atuante na ordenação do sistema, mas é preciso considerar que a velocidade é resultado do revolvimento do solo, o qual atua também na quebra dos macroagregados. Desta forma, os fatores atuantes na ordenação interagem entre si.

O ideal para o sistema funcionar e atingir estados de ordem em nível alto é ter fluxo alto e lento (baixo K_2) para que a grande quantidade de energia e matéria que entra no sistema conduza à formação de estruturas complexas e que estas persistam por maior tempo possível. O sistema campo nativo deve apresentar um k_2 semelhante ou menor que o *sd avmc*, por não ter revolvimento de solo, associado ao alto fluxo, como foi visto no Estudo 1, confere a este sistema nível de ordem elevado.

Os sistemas em semeadura direta com a mesma distribuição de agregados nas classes de diâmetro tiveram níveis de ordem distintos, sendo o *sd avmc* superior, em função da quantidade retida de carbono. Isto é justificado porque o carbono presente no sistema está interagindo com os componentes, fazendo parte da estrutura. Por este motivo, a estrutura do *sd avmc* está mais complexa, pois num mesmo tamanho de agregado há mais moléculas orgânicas que estão fazendo interações com os demais componentes do sistema, aumentando a diversidade das relações e do comportamento do sistema. Como o nível de ordem alto é caracterizado pela maior complexidade das estruturas, fica evidente que o *sd avmc* foi mais complexo.

Analisando os níveis de ordem (Tabela 9 e Figura 17) e a magnitude dos fluxos de carbono simulados no Estudo 1 (Tabela 3) concluiu-se que o aumento do fluxo conduziu ao aumento no nível de ordem nos sistemas com mesmo grau de revolvimento do solo. O revolvimento rompe a seqüência de ordenação, que mesmo o maior fluxo não foi suficiente para superar, como é o caso do *pc avmc* com nível de ordem menor que o *sd am*.

No Estudo 1, pela avaliação do comportamento dos fluxos mensais no período de um ano (Figura 11), pressupôs-se que os sistemas com maior adição foram mais instáveis, mais dependentes da quantidade atual adicionada de energia e matéria para manter o mesmo nível de ordem. E os sistemas com menor adição foram mais estáveis, provavelmente pela estrutura menos complexa, mais dependentes dos minerais e menos da quantidade de energia e matéria, de forma que o fluxo não causou tanto efeito. Pelos valores de níveis de ordem (Figura 17) esta pressuposição é confirmada, pois a distribuição dos agregados nas classes de diâmetro foi muito semelhante nos sistemas com mesmo grau de revolvimento do solo (Figura 15), tendo grande diferença entre os níveis de ordem devido ao teor de carbono retido (Tabela 9). Portanto, o que conferiu

complexidade à estrutura foi a quantidade retida de energia e matéria, que por sua vez está relacionada com a quantidade adicionada.

Neste sentido está inserida a dinâmica do funcionamento do sistema solo. Para os sistemas manter o nível de ordem atual é necessário manter o fluxo, a mesma quantidade adicionada de energia e matéria por unidade de tempo, pois se o fluxo diminui, o sistema tende à desestruturação, baixando o nível de ordem.

Qualidade do solo está associada ao nível de ordem alto, onde as propriedades emergentes capacitam o sistema solo exercer suas funções na natureza. O nível de ordem alto depende da matéria orgânica lábil, caracterizada pelas raízes e hifas (responsáveis em unir microagregados em macroagregados) e pelas partes do tecido vegetal (MOP) (responsáveis em formar macroagregados por encrostamento de minerais e de microagregados). Esta matéria orgânica lábil é facilmente consumida pelos microrganismos, devido à sua composição química e física, o que pode comprometer a estrutura do sistema solo.

Beare et al. (1994) determinaram a estabilidade de agregados em diferentes classes de diâmetro, e os agregados maiores que 2 mm foram os menos estáveis. Isto porque é a classe que depende da matéria orgânica lábil, menos protegida física e quimicamente. Mas é justo esta classe de agregados a principal formadora do nível de ordem alto do sistema solo. Para que a estrutura e o comportamento do sistema solo em nível alto permaneça é preciso que os agentes formadores dos agregados maiores que 2 mm sejam mantidos. Isto é possível com o aporte contínuo de energia e matéria, via cultivo de plantas. Pelo cultivo, as plantas, além de contribuírem com a adição de energia e matéria da parte aérea, das raízes e dos exsudatos, contribuem com o sistema radicular. As raízes atuam mecanicamente na formação dos macroagregados e estimulam a microbiota (Miller e Jastrow, 1992; Jastrow et al., 1998), que muitas vezes é mais determinante na agregação do sistema que a própria planta (Foster, 1979).

Através das plantas ocorre o estímulo, também, dos macrorganismos, que auxiliam na quebra dos resíduos vegetais para posterior consumo pela microbiota, além de formar macroagregados pelos coprólitos e poros no solo quando se locomovem pelo sistema.

Como referido anteriormente, as plantas são a fonte geradora de energia e matéria para o sistema solo. E pela influência direta que elas exercem sobre os componentes e suas complexas interações (Beare et al., 1995), que a diversidade da comunidade vegetal é ponto essencial para estimular o sistema nos seus vários níveis hierárquicos.

Num ambiente de solo diversificado física, química e biologicamente, a ciclagem biogeoquímica dos nutrientes é favorecida, aumentando o aproveitamento dos mesmos no sistema e diminuindo o escape de pequenas moléculas. Além disso, a diversidade aumenta a capacidade de suportar estresse, conferindo maior resistência do sistema a perturbações, e, conseqüentemente, aumentando sua resiliência.

Para que as relações entre os componentes não sejam rompidas e a estrutura quebrada, alterando as propriedades emergentes e comprometendo o funcionamento do sistema solo, o revolvimento do solo deve ser evitado. Segundo Lal (1993), o revolvimento afeta a taxa e a intensidade de processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem no solo, modificando a resiliência e a qualidade do mesmo.

Portanto, para que um sistema atinja ou mantenha qualidade do solo é preciso favorecer o nível alto de ordem. Para isto, deve-se buscar práticas de manejo que promovam o aporte contínuo e diversificado de material vegetal, via cultivo de plantas, e o não revolvimento do solo.

Esta evidência concorda com trabalhos que propõem atributos para determinar qualidade do solo que dependem da adição contínua de resíduos vegetais, como é o caso da quantidade de MOP de Gregorich et al. (1994) e de Bolinder et al. (1999), da relação carbono lábil pelo carbono total de Blair et al. (1997) e da quantidade de carbono lábil

de Franzluebbbers et al. (1998), bem como trabalhos que relacionam estes atributos com o surgimento de propriedades emergentes como maior CTC (Zech et al., 1997) e maior complexação do alumínio (Oades et al., 1989), e ainda, a visão holística de Carter (2001), que enumera, além de várias propriedades emergentes, os processos pedológicos nos quais elas interferem. Neste mesmo sentido de adição contínua de resíduos, Islam e Weil (2000) concluíram que sistemas de produção com espécies vegetais bem adaptadas e de rápido crescimento podem melhorar gradualmente a qualidade do solo e recuperar terras degradadas.

5.2.2. Sistemas Solo Conduzidos Sem ou Com Baixo Grau de Revolvimento do Solo

Com base nos resultados obtidos com os sistemas cujos fluxos foram simulados, verificou-se que o grau de revolvimento foi determinante para a ordenação dos sistemas. Portanto, um outro conjunto de sistemas solo foi avaliado (Figura 18) para analisar a contribuição das plantas neste processo, já que as plantas são a fonte geradora de energia e matéria. Todos os sistemas desse conjunto são conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo (Tabela 7), sobre o mesmo tipo de solo (PVd), mas com diferentes tipos de plantas.

Na Figura 18 consta a distribuição dos agregados nas classes de diâmetro destes sistemas. O sistema *pangola* teve comportamento equivalente ao *CN PVd* (Figura 18A). O *CN PVd* é a vegetação nativa e o solo nunca foi revolvido, por isto é considerado como o estado original deste tipo de solo. Sendo assim, o sistema *pangola* atingiu o estado original de ordenação em 17 anos. A ordenação deste sistema é devido, principalmente, ao processo de agregação pela ação das raízes, conforme descrevem Bradfield (1937) e Jastrow e Miller (1998). A densidade de raízes da *pangola* é elevada quando comparada a outra planta. Silva e Mielniczuk (1998) determinaram densidade

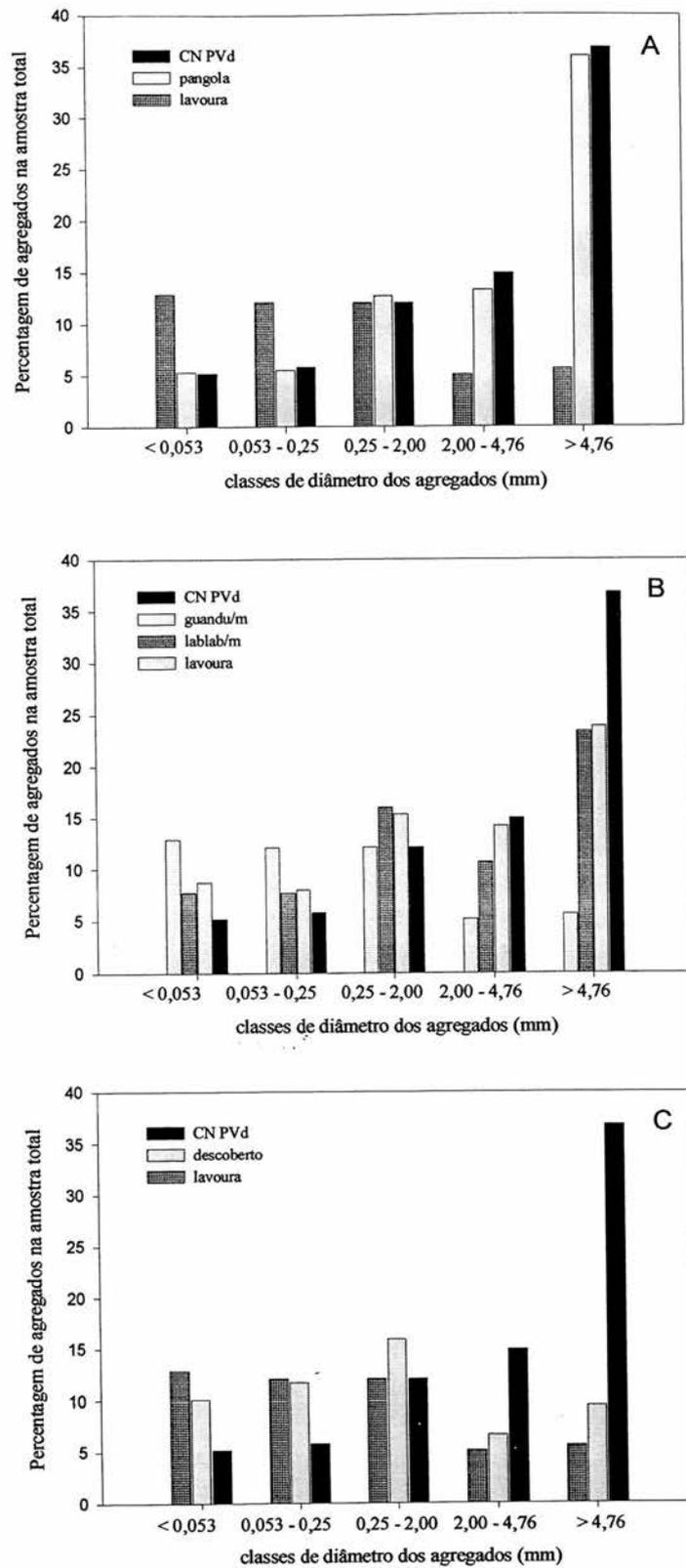


FIGURA 18. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVd, conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo. Combinações de alguns sistemas (A a C). CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; m= milho

de raízes de pangola em $6,0 \text{ cm cm}^{-3}$, enquanto o sistema aveia/milho foi de $1,1 \text{ cm cm}^{-3}$ na profundidade de 0 a 10 cm do perfil do solo. Esta alta densidade de raízes, além da entrada de energia e matéria, atua fisicamente na formação de macroagregados, entrelaçando agregados e retirando água do meio, o que aumenta as forças de coesão entre as partículas e promove a deposição de agentes cimentantes na superfície dos agregados. O outro efeito das raízes é o estímulo ao desenvolvimento de hifas de fungos micorrízicos (Miller e Jastrow, 1992), que chegam a ter efeito direto na macroagregação do solo mais pronunciado que as raízes (Miller e Jastrow, 1990).

A situação de solo degradado, que os sistemas partiram em 1983, pode ser representada pelo sistema *lavoura*, pois neste o revolvimento do solo foi mantido duas vezes ao ano até 5 anos atrás. Sendo assim, a Figura 18A demonstra o caminho que o sistema percorreu do ano de 1983 à 2000, quando plantas de pangola foram cultivadas. Inicialmente, o sistema tinha maior proporção de agregados com estrutura simples, de menor diâmetro. A introdução de plantas de pangola conduziu o sistema a organizar seus componentes em estruturas mais complexas e maiores, tanto que mais de 40% do sistema está em agregados maiores que 2 mm, enquanto o sistema *lavoura* tem pouco mais de 10%.

Os sistemas *lablab/m* e *guandu/m* apresentaram comportamento semelhante entre si (Figura 18B). Estes sistemas possuem diferenças quanto à quantidade adicionada de carbono (Tabela 10). O guandu é um arbusto, com produção de galhos de diâmetro acima de 2 cm e de composição mais lignificada. Lablab é uma planta rasteira, que cobre a superfície do solo. Ambas proporcionam alta adição de energia e matéria ao sistema, a maior quantidade adicionada do guandu (Tabela 10) deve-se à presença de galhos com peso superior ao material do lablab. Considerando que os sistemas avaliados partiram de uma mesma situação de solo degradado, aqui representada pelo sistema *lavoura*, pode-se inferir que o *guandu/m* e *lablab/m* se auto-organizaram em outro

estado de ordem, em função das plantas, pela adição de matéria vegetal, presença de raízes e estímulo à biota do solo. A quantidade adicionada de energia e matéria e o não revolvimento do solo permitiu que os sistemas formassem estruturas mais complexas, de maior diâmetro, em relação à situação inicial.

TABELA 10. Quantidade de carbono, em Mg ha^{-1} , adicionada anualmente pelas plantas nos sistemas solo conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.

Sistemas Solo	Carbono adicionado pelas plantas	
	$\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	Fonte
<i>CN PVd</i> ⁽¹⁾	-	-
<i>lablab/m</i>	6,1	Burle et al., 1997 ⁽²⁾
<i>guandu/m</i>	8,9	Burle et al., 1997
<i>descoberto</i>	0,7	Burle et al., 1997
<i>lavoura</i>	3,5	estimado
<i>pangola</i>	5,4	Burle et al., 1997
<i>CN PVAd</i>	-	-
<i>sem adição</i>	0	Streck, 1999

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; m = milho; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

⁽²⁾ Aos dados de Burle et al. (1997) foram acrescidos 30% referente às raízes.

O sistema *descoberto*, apesar de ser mantido praticamente sem plantas, apresentou uma tendência de aumentar a proporção de agregados nas classes de diâmetro maior, em relação ao *lavoura* (Figura 18C). Como fazem 12 anos que o solo do sistema *descoberto* não é revolvido, a pouca adição de energia e matéria, em torno de $0,7 \text{ Mg de carbono ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, conduziu o sistema a organizar seus componentes em agregados. O fato de não ocorrer revolvimento permitiu que o processo de agregação, promovido pela contribuição das plantas, mesmo que pequena, fosse mantida. Por outro

lado, o histórico de revolvimento do solo do sistema *lavoura*, por 23 anos, sendo apenas os últimos 5 anos em semeadura direta, não permitiu que o sistema *lavoura* formasse estruturas mais complexas, mesmo com maior quantidade adicionada de carbono pelas plantas que o *descoberto* (Tabela 10). Este tempo em semeadura direta ainda não foi suficiente para permitir que o sistema *lavoura* avançasse em ordenação. A composição do sistema *lavoura* foi, principalmente, de agregados na classe de diâmetro menor que 2 mm.

O sistema *descoberto* representa a situação de reconsolidação natural do solo da área experimental, que era degradada em 1983. A diferença entre o *descoberto* e os sistemas *pangola*, *guandu/m* e *lablab/m* é o cultivo das plantas, que conduziram o sistema solo para outro estado de ordem.

Analisando a quantidade de solo agregado na camada de 0 a 7,5 cm do perfil e o carbono presente no sistema (Figura 19) observa-se que houve uma relação entre a massa de solo agregado e a distribuição de agregados nas classes de diâmetro para os sistemas *lavoura* e *descoberto*. O *descoberto* com maior concentração de agregados nas classes de diâmetro maiores que 2 mm teve maior massa de solo agregado (Figura 19). A proporção maior de estruturas mais complexas, capacitou o sistema *descoberto* reter maior quantidade de carbono que o *lavoura*, mesmo tendo a metade da quantidade adicionada (Tabela 10).

Os sistemas *guandu/m* e *lablab/m* foram semelhantes na massa de solo agregado e retenção de carbono. O sistema *pangola* teve quantidade de solo agregado semelhante a estes dois. A diferença está em que a ação mecânica das raízes foi capaz de conduzir o sistema *pangola* a formar agregados com diâmetro maior, portanto a composição da massa de solo agregado do *pangola* teve maior proporção de estruturas mais complexas que os sistemas *guandu/m* e *lablab/m* (Figura 18). Como o sistema *pangola* tem menor quantidade adicionada de carbono que os outros dois (Tabela 10), a quantidade retida também foi menor. Mas se a adição for aumentada, o *pangola* deve

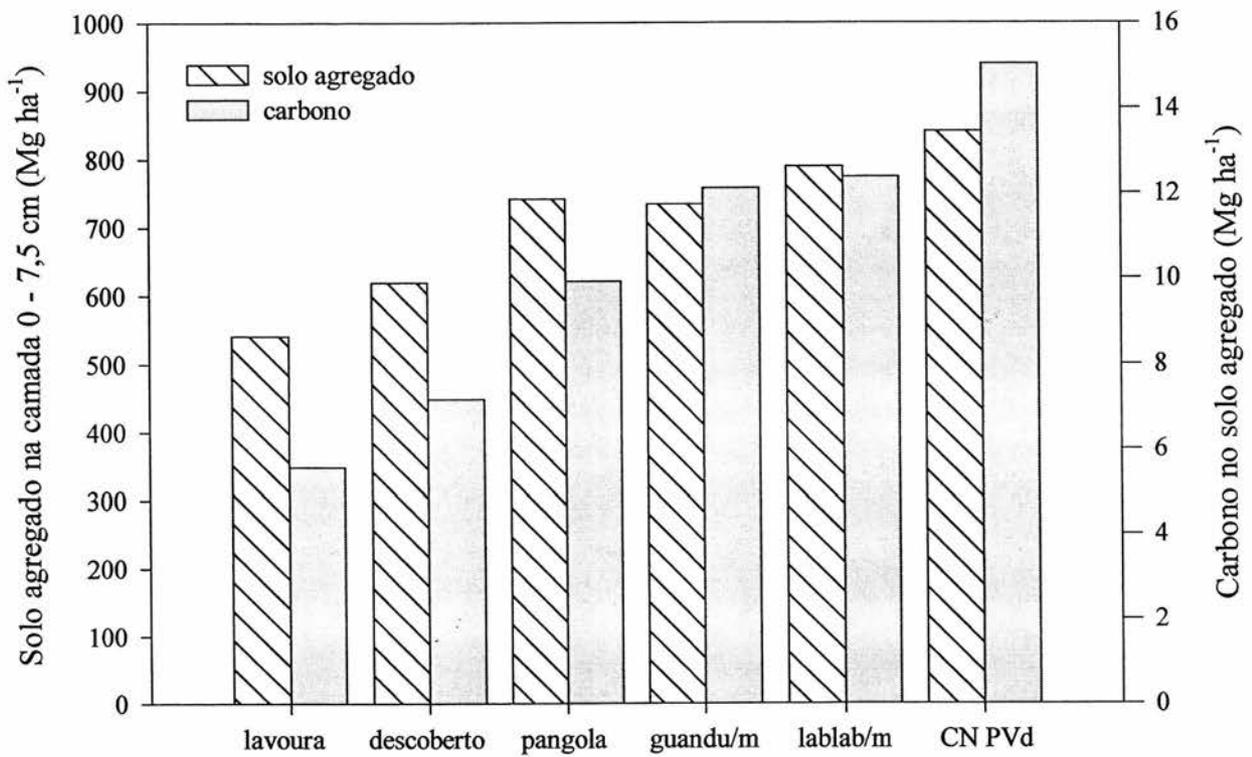


FIGURA 19. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas solo sobre PVd, conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo. m = milho; CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico.

apresentar aumento na quantidade retida de carbono, em função das suas estruturas complexas, que o capacitam para isto.

Para confirmar a contribuição das plantas no processo de ordenação do sistema solo, buscou-se avaliar o sistema *sem adição*. Como este está sobre outro tipo de solo, o sistema em vegetação nativa deste solo (*CN PVAd*) também foi avaliado como referência. Nas Figuras 20 e 21 constam a distribuição dos agregados nas classes de diâmetro e as quantidades de solo agregado e de carbono presente nos sistemas, respectivamente.

O sistema *sem adição* é mantido praticamente sem plantas por 25 anos, e o revolvimento do solo cessou apenas há 16 meses. Por não ter adição de energia e matéria, principalmente de raízes, essencial para formação dos macroagregados, o sistema não foi capaz de formar agregados nas classes de diâmetro maiores (Figura 20). Em quantidade de solo agregado, o *sem adição* diferiu do *CN PVAd* apenas em 7% (Figura 21), mas a distribuição nas classes de diâmetro é muito distinta. O *CN PVd* tem 33% da massa de solo em agregados de diâmetro maior que 2 mm, enquanto o *sem adição* apenas 2,5 %. O sistema *sem adição* teve baixa quantidade de carbono retido, devido à ausência de estruturas complexas. Este carbono, provavelmente, está em interações físico-químicas com os minerais, pois como não há adição de plantas, a matéria orgânica mais lábil, de persistência mais curta no solo, já foi consumida pelos organismos. Portanto, esta quantidade de energia e matéria presente no sistema não é fonte prontamente disponível para a biota do solo, e deve, provavelmente, ter baixa presença de organismos no sistema.

Da mesma forma que nos sistemas anteriores, obteve-se valores para os níveis de ordem destes sistemas. Os dados estão apresentados na Tabela 11 e Figura 22. Com este conjunto de sistemas da Figura 22, verificou-se a contribuição das plantas na ordenação dos sistemas solo. Houve diferenças nos níveis de ordem, em função das

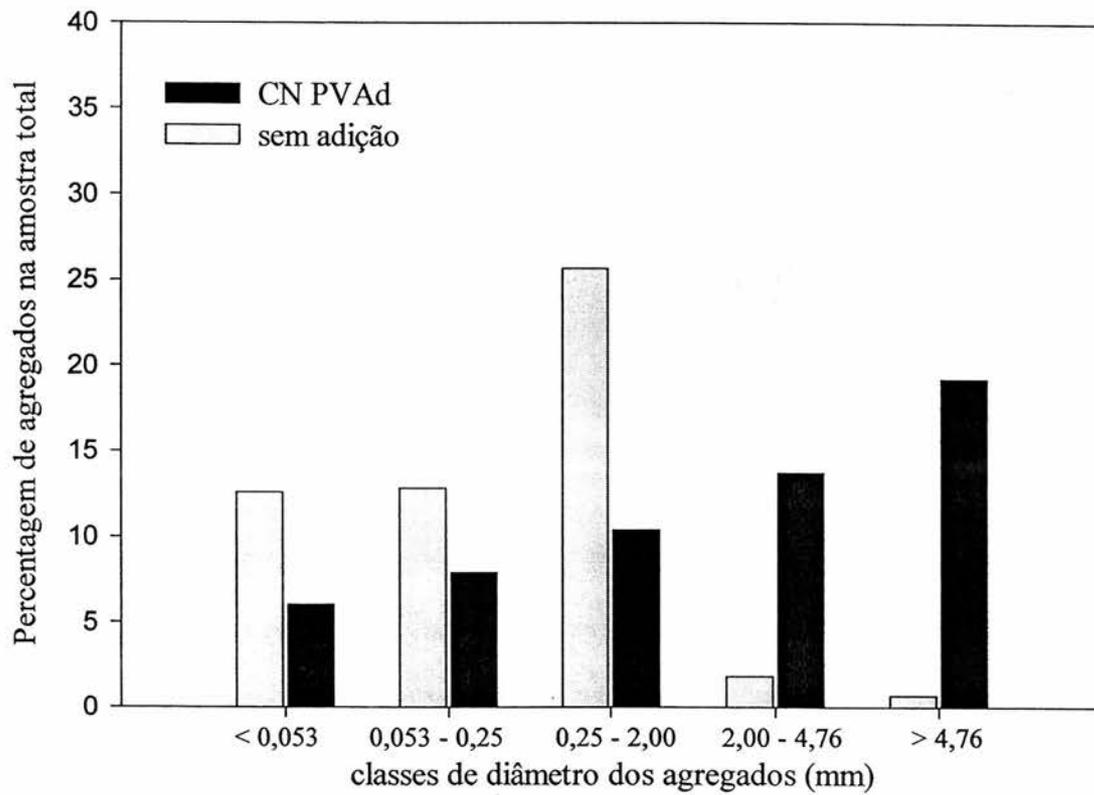


FIGURA 20. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVAd.

CN = campo nativo; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

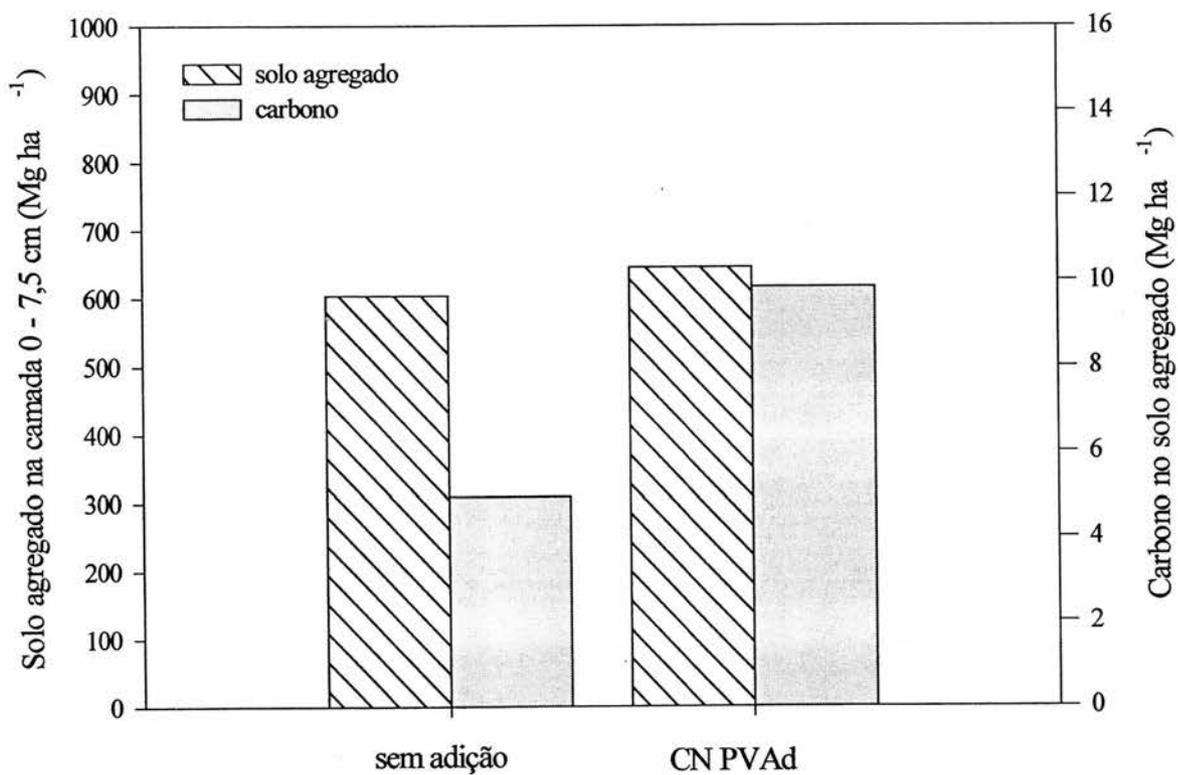


FIGURA 21. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas solo sobre PVAd.
CN = campo nativo; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

características fenológicas das plantas e das quantidades adicionadas de carbono ao longo do tempo (Tabela 10).

TABELA 11. Valor relativo dos sistemas ao campo nativo correspondente quanto à quantidade de carbono total no solo e à proporção de agregados > 2mm, e o nível de ordem dos sistemas solo conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.

Sistemas Solo	Valor Relativo carbono total (VR Ct)	Valor Relativo agregados >2mm (VR agr>2)	Nível de Ordem ⁽¹⁾
<i>CN PVd</i> ⁽²⁾	10,0	10,0	100,0
<i>lavoura</i>	5,8	2,1	12,2
<i>descoberto</i>	6,5	3,1	20,2
<i>pangola</i>	7,5	9,5	71,2
<i>guandu/m</i>	9,2	7,3	67,2
<i>lablab/m</i>	8,8	6,6	58,1
<i>CN PVAd</i>	100,0	100,0	100,0
<i>sem adição</i>	5,4	0,8	4,3

⁽¹⁾ Nível de Ordem = (VR Ct * VR agr>2)

⁽²⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; m = milho; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

O sistema *lavoura* teve menor nível de ordem devido aos dois atributos, baixo carbono total no solo e baixo peso de agregados maiores que 2 mm. O nível de ordem refletiu o efeito do revolvimento do solo por muito tempo, que o manejo em semeadura direta por 5 anos ainda não foi capaz de recuperar, tanto que a adição de carbono ainda é baixa (Tabela 10).

O *descoberto* com pouca adição de carbono teve baixo nível de ordem. A pequena presença de plantas não contribuiu com raízes para a formação de macroagregados, ao contrário do sistema *pangola*, onde a densidade de raízes promoveu o maior peso de agregados maiores que 2 mm entre os sistemas avaliados, o

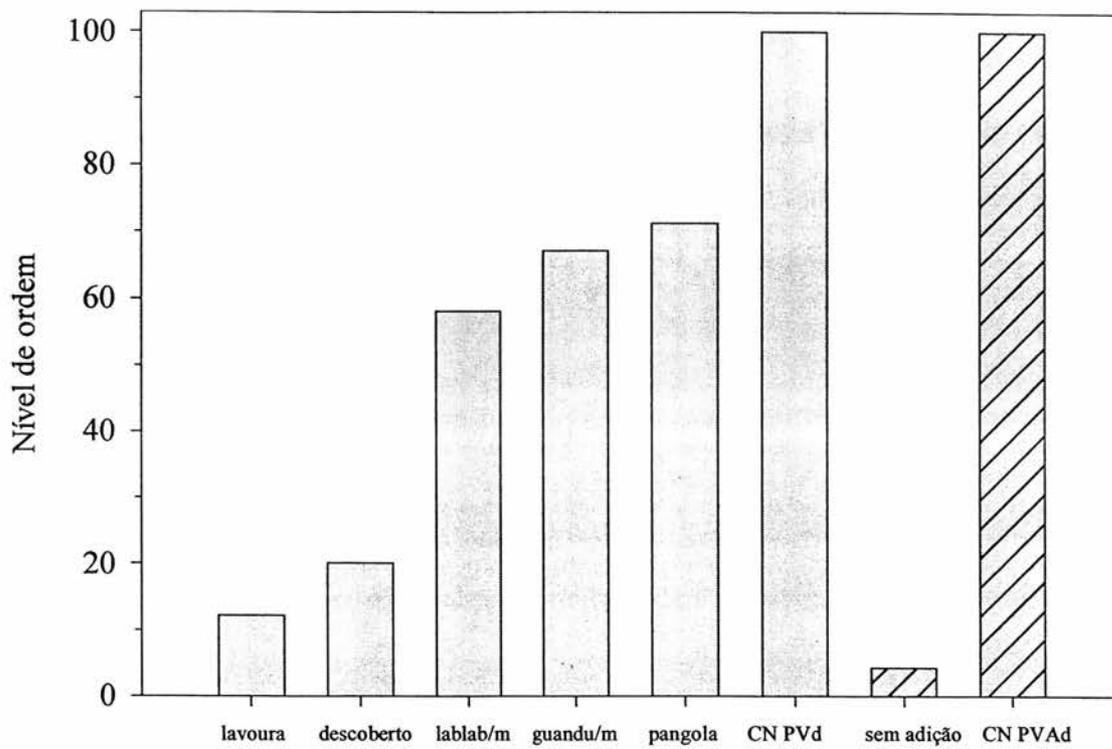


FIGURA 22. Níveis de ordem dos sistemas solo sobre PVd e PVAd, conduzidos sem ou com baixo grau de revolvimento do solo.
 m = milho; CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

que foi determinante para o *pangola* obter o mais alto nível de ordem, pois em quantidade retida de carbono o valor relativo foi mais baixo que os sistemas *guandu/m* e *lablab/m*.

Os sistemas *guandu/m* e *lablab/m*, apesar de apresentarem comportamento semelhante na distribuição de agregados nas classes de diâmetro, na quantidade de solo agregado e na quantidade de carbono retido no sistema, pela análise do nível de ordem, verifica-se uma diferença a favor do *guandu/m*, em ambos atributos que compuseram o nível de ordem, provavelmente, refletindo a maior adição de energia e matéria nesse sistema em relação ao *lablab/m*.

O valor mais baixo referente ao nível de ordem foi de apenas 4,3, verificado no sistema *sem adição*. A agregação maior que 2 mm praticamente não existiu neste sistema, evidenciando que a contribuição das plantas para ordenação dos demais sistemas solo foi fundamental, através do aporte de energia e matéria da parte aérea e do sistema radicular, e pela ação mecânica das raízes.

Os sistemas campo nativo (*CN PVd* e *CN PVAd*), onde a adição de resíduos é contínua e diversificada e sem revolvimento do solo, apresentaram maior nível de ordem. Addiscott (1994) afirma que “a vegetação nativa de um tipo de solo é o estado de maturidade para o qual todos os sistemas tendem”. Segundo o autor, sistemas na sua maturidade são mais resilientes. Esta propriedade emergente é resultado das interações da estrutura diversificada e complexa deste sistema. Mas, por outro lado, geralmente, os sistemas campo nativo são desfavoráveis quimicamente para produção agrícola, sendo necessário práticas de calagem e de adubação mineral para viabilizar a adição de energia e matéria pelas plantas. Após estas práticas, sistemas com alta adição de energia e matéria e sem revolvimento do solo podem superar o campo nativo em quantidade de carbono no solo (Corazza et al., 1999; Amado et al., 2001), com potencial de gerar estados de ordem em nível superior ao sistema campo nativo.

Como o nível de ordem dos sistemas é relativo à ordenação dos componentes em estruturas e à quantidade retida de energia e matéria, fez-se a relação entre a quantidade de solo agregado e a quantidade de carbono presente dos sistemas conduzidos sobre o solo PVd (Figura 23), a fim de analisar a contribuição do carbono para a agregação do sistema. O melhor ajuste apresentou uma relação quadrática, onde à medida que aumentou a quantidade de carbono nos sistemas, o incremento na agregação do solo diminuiu. Por exemplo, quando a quantidade de carbono no sistema foi de 12 Mg ha⁻¹, cada Mg de carbono contribuiu para agregar 34 Mg de solo ha⁻¹, mas quando a quantidade de carbono foi de 20 Mg ha⁻¹, a contribuição de cada Mg de carbono foi para agregar apenas 13 Mg de solo ha⁻¹.

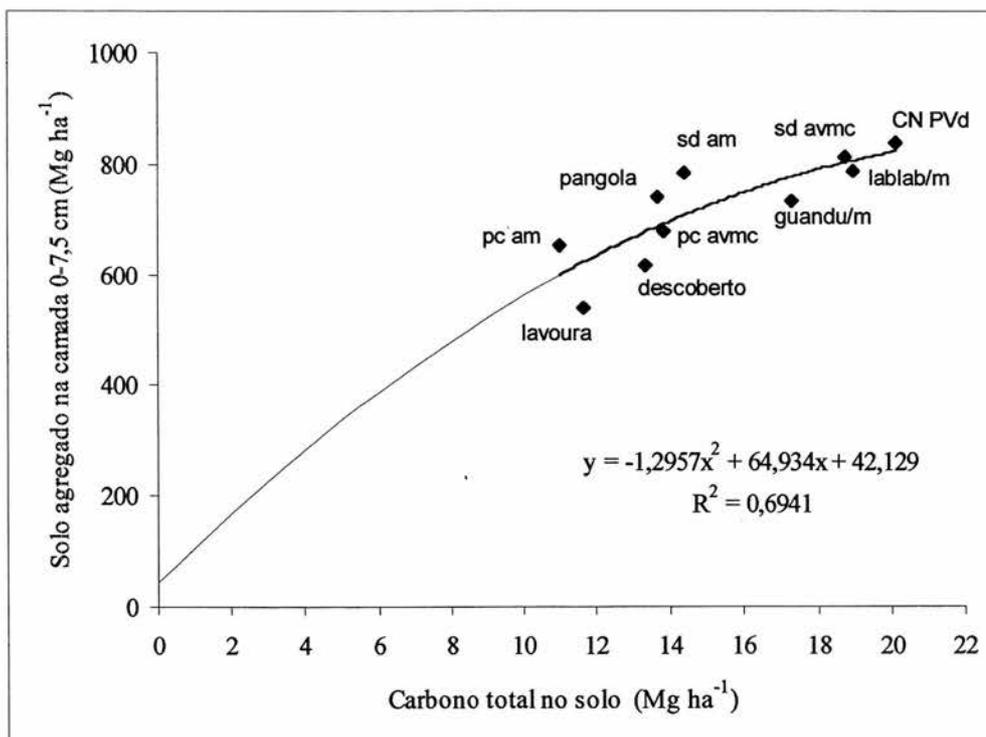


FIGURA 23. Relação entre quantidade de solo agregado e quantidade de carbono total no solo nos sistemas solo sobre PVd.

pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi; CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico.

Conforme a equação, a quantidade máxima de solo agregado foi atingida com 25 Mg de carbono ha^{-1} . Isto significa que o *CN PVd* com 20 Mg de carbono ha^{-1} está, praticamente, no patamar de ordenação para este tipo de solo. A interseção da linha de tendência no eixo das coordenadas ocorreu no valor de 42 Mg de solo agregado ha^{-1} , o que corresponde a massa de solo agregado que não depende do carbono, apenas das interações físico-químicas dos minerais e dos íons metais. Para outros tipos de solo esta relação deve ser diferente. Em solos com mineralogia composta por argilominerais 2:1, por exemplo, pode ocorrer a formação de agregados pelo processo de expansão e contração destes minerais, dependendo das condições hídricas do meio. Em solos com alto teor de argila e grande presença de óxidos também pode ocorrer a formação de macroagregados pelo processo de interação destes minerais, promovidos por processos de compressão por máquinas e ciclos de umedecimento e secagem do solo. Com isto, o comportamento dos sistemas sobre diferentes tipos de solo pode ser distinto, mas acredita-se que a presença de plantas potencializa o processo de agregação, devido à entrada de energia e matéria no sistema, o que promove a interação dos componentes.

5.2.3. Sistemas Solo em Vegetação de Campo Nativo

Em complementação às análises anteriores, três sistemas em vegetação de campo nativo e granulometria e/ou mineralogia (Tabela 4) diferentes foram avaliados. Pressupondo que os sistemas campo nativo tem quantidade semelhante de energia e matéria adicionada, foi possível analisar o comportamento dos três tipos de solo quanto aos estados de ordem. A distribuição dos agregados nas classes de diâmetro e as quantidades de solo agregado e de carbono retido nestes sistemas são apresentadas nas Figuras 24 e 25.

O *CN PVAd* apresentou aumento contínuo na percentagem de agregados da classe de diâmetro $< 0,053$ mm para a $> 4,76$ mm, enquanto o *CN LVdf* apresentou uma

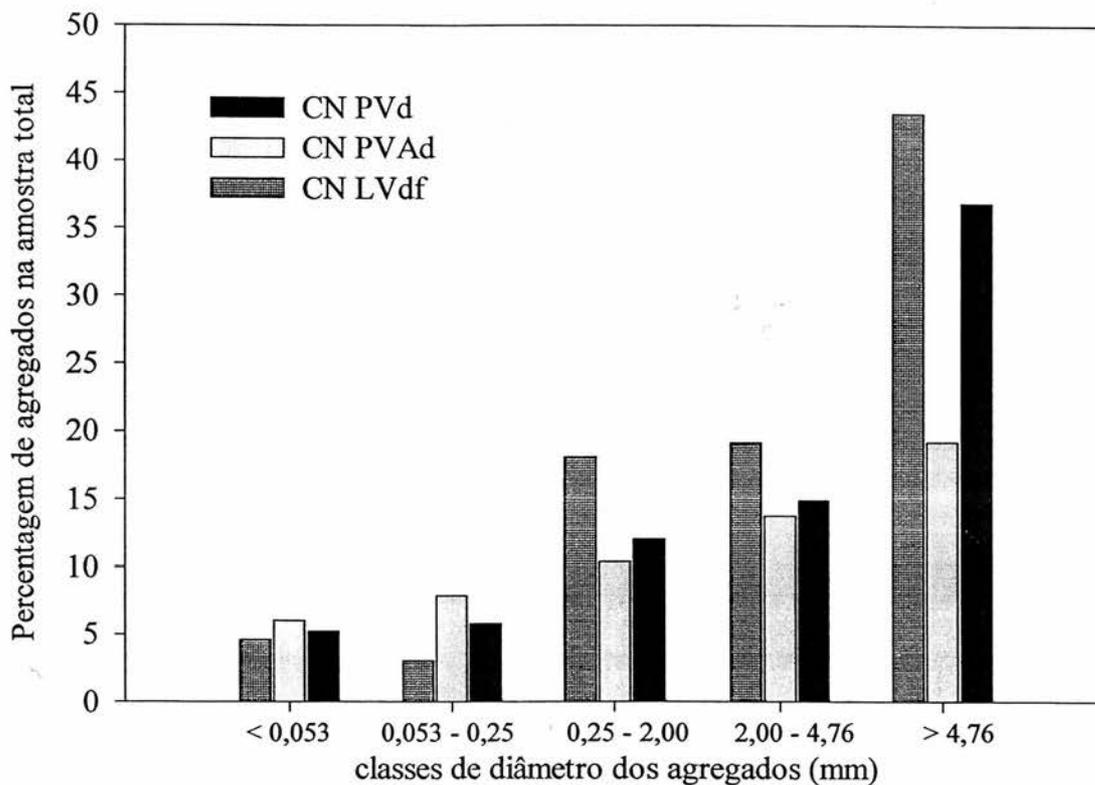


FIGURA 24. Distribuição dos agregados nas classes de diâmetro dos sistemas campo nativo de três diferentes tipos de solo.

CN = campo nativo; PVD = Argissolo Vermelho Distrófico típico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho Distroférico típico.

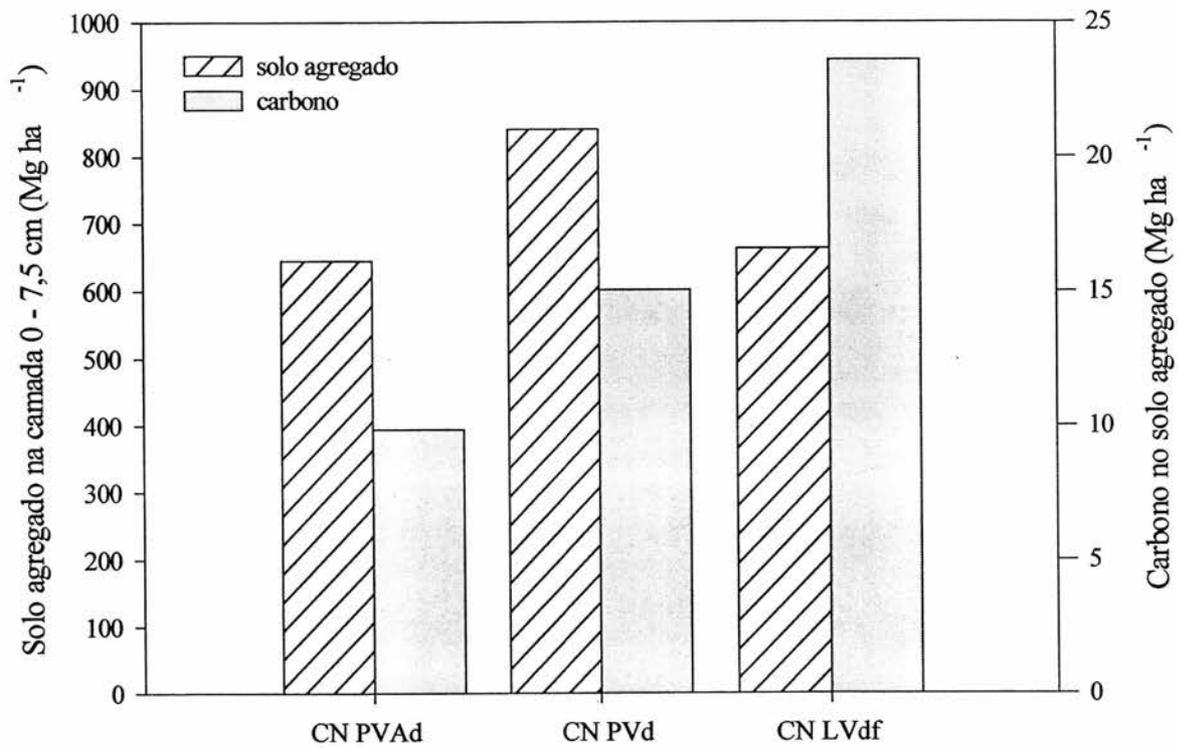


FIGURA 25. Quantidades de solo agregado e de carbono retido nos sistemas campo nativo de três diferentes tipos de solo.
 CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho Distroférico típico.

diferença de 40 pontos percentuais da classe menor para a maior (Figura 24). A maior concentração de macroagregados no sistema *CN LVdf* foi devido ao tipo de mineralogia e à granulometria deste solo, composta, principalmente, por óxidos e argilominerais 1:1 na fração tamanho argila, que representa 70% da granulometria total (Tabela 4). Estes minerais, além de serem altamente reativos, estão presentes em grande quantidade na massa de solo e interagem entre si pela diferença de carga no pH natural desse solo, favorecendo a formação de agregados em todas as classes de diâmetro. Na presença de plantas, que adicionam compostos orgânicos e matéria orgânica particulada, estes minerais interagem facilmente com a energia e a matéria adicionadas, estabilizando os agregados formados. Por outro lado, o PVAd tem 170 g kg^{-1} de partículas na fração tamanho argila, sendo a maior parte de argilominerais 1:1 (Tabela 4). A menor quantidade de argilominerais e óxidos na fração tamanho argila diminuiu a capacidade do sistema formar agregados por interações físico-químicas dos minerais.

A diferença na percentagem de agregados da classe $> 4,76 \text{ mm}$ entre os sistemas *CN PVd* e *CN PVAd* foi devido à menor quantidade de partículas tamanho argila do solo PVAd, que não favoreceu a formação de estruturas nem a estabilidade das mesmas, resultando em baixa proporção de agregados $> 2 \text{ mm}$, em relação aos demais tipos de solo.

A baixa densidade do solo *LVdf* (Apêndice 16), em função da sua granulometria, resultou na menor massa de solo agregado comparado aos Argissolos (Figura 25). Mas a mineralogia do *LVdf*, composta, principalmente, por minerais altamente reativos, proporciona sítios de interação com a energia e a matéria adicionadas ao sistema, o que refletiu na maior quantidade de carbono retido dos três tipos de solo (Figura 25).

Os sistemas *CN PVAd* e *CN PVd* estão nas mesmas condições climáticas e apresentam a mesma densidade de solo (Apêndice 16), portanto as diferenças nas

quantidades de solo agregado e de carbono retido entre eles foi devido, principalmente, à composição granulométrica e à quantidade de óxidos de ferro, já que a mineralogia da fração argila destes solos é, praticamente, a mesma (Tabela 4). A maior quantidade de partículas mais reativas no *CN PVd* foi capaz de interagir com maior quantidade de energia e matéria, o que favoreceu a união dos componentes do sistema em agregados e, conseqüentemente, a retenção de carbono foi maior.

Cada tipo de solo, provavelmente, tem um patamar de nível de ordem, em função dos seus componentes intrínsecos e do fluxo de energia e matéria que passa pelo mesmo. Como foi visto no solo PVd (Figura 23), à medida que aumentou a quantidade de carbono retido aumentou a ordenação dos sistemas até um patamar, que no caso foi representado pelo *CN PVd*. A alteração deste patamar, que ocorre nas bifurcações dos sistemas abertos referidas no item 3.1. Noções da Termodinâmica do Não-Equilíbrio, só é possível se houver entrada no sistema de mais componentes intrínsecos, que em função do fluxo se auto-organizariam em outros níveis de ordem. À medida que estes componentes aumentassem, o sistema atingiria níveis de ordem sucessivamente mais elevados. Esta pressuposição pode ser visualizada no esquema demonstrado na Figura 26. Nesta figura a linha em estado de ordem em nível mais baixo representa a condição de um sistema solo em que o aumento no fluxo de energia e matéria proporciona aumento na formação de agregados e, conseqüentemente, no nível de ordem, até um determinado ponto, a partir do qual, a adição não gera mudança no estado de ordem para outro nível. Para que ocorra mudança no nível de ordem é necessário adicionar algum componente que atue como agente agregante, como por exemplo, sítios de interação, através de argilominerais e óxidos, para que a energia e a matéria adicionadas pelo fluxo interajam com o sistema e resultem na formação de estruturas mais complexas, elevando o nível de ordem. Mas, da mesma forma, a adição de sítios de interação, promove aumento no nível de ordem até um novo patamar, no qual ocorre a

saturação destes sítios. A partir daí, o aumento no nível de ordem é possível com a adição de outro componente, como raízes e hifas, que da mesma forma, promove a geração de estados de ordem em nível mais alto até atingir novo patamar. As linhas paralelas representam tipos diferentes de solo, que em função dos seus componentes intrínsecos tem capacidade de gerar estados de ordem em diferentes níveis, tendo comportamento semelhante, mas em patamares diferentes. O Solo A, por exemplo, tem menor quantidade de agentes agregantes na sua composição original que o Solo B, e este menor que o Solo C.

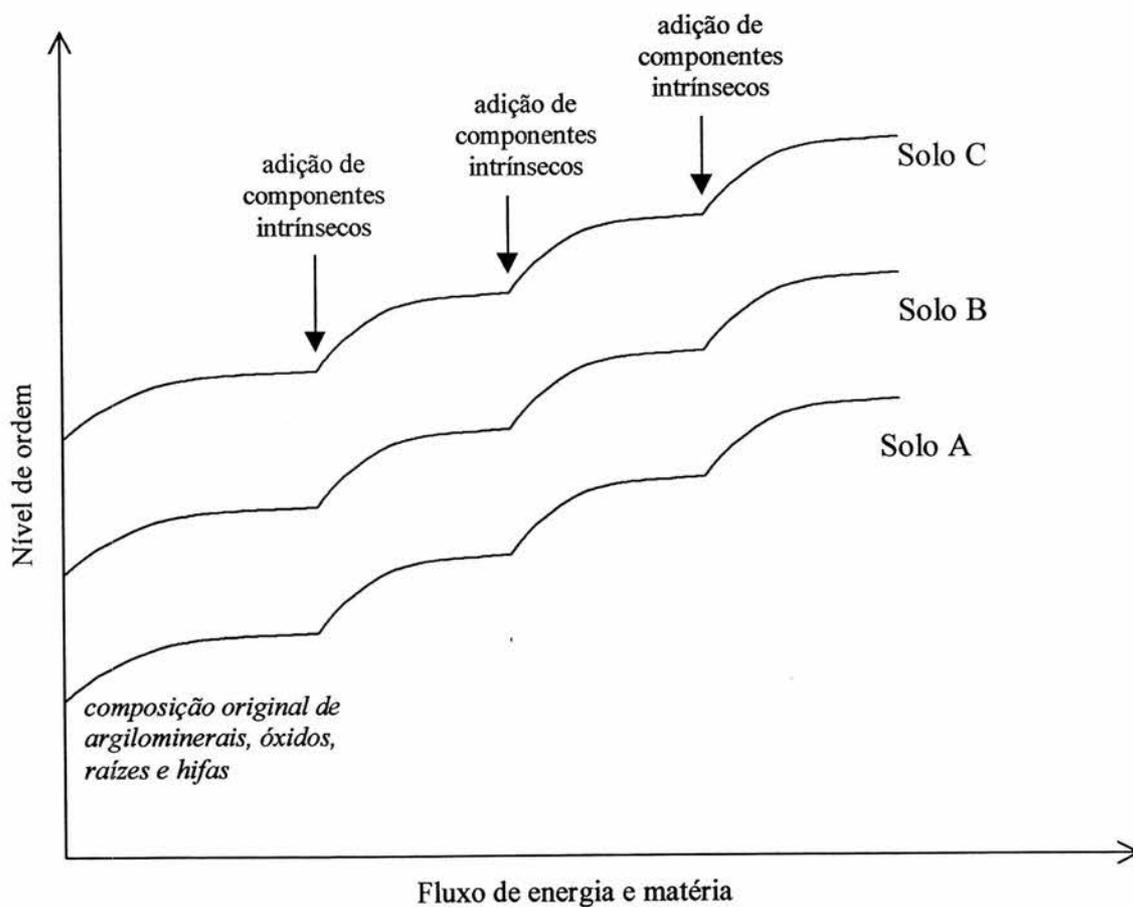


FIGURA 26. Representação esquemática dos patamares de níveis de ordem em função do fluxo de energia e matéria e dos componentes intrínsecos do sistema.

A partir da análise deste Estudo, conclui-se que para um sistema solo de mesma composição granulométrica e mineralógica, o aumento no fluxo de energia e matéria promove estados de ordem em nível superior ao precedente quando não há revolvimento do solo, permitindo que a energia e a matéria adicionadas resultem na formação de estruturas mais complexas e diversificadas, capazes de reter a quantidade adicionada.

6. CONCLUSÕES

Com a fundamentação teórica da termodinâmica do não-equilíbrio foi possível construir o conhecimento em relação ao funcionamento do sistema solo na produção agrícola e compreender as condições que conduzem o sistema à qualidade.

As avaliações das quantidades de carbono adicionadas e liberadas e a distribuição dos agregados do solo nas classes de diâmetros foram adequadas para expressar o fluxo de energia e matéria e os estados de ordem, respectivamente. Com estas avaliações pôde-se analisar o comportamento de sistemas solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISCOTT, T.M. Simulation, prediction, foretelling or prophecy? Some thoughts on pedogenetic modeling. In: BRYANT, R.B.; ARNOLD, R.W. (Eds.) **Quantitative modeling of soil forming processes**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.1-15. (Special Publication, 39)
- ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, n.2, p.161-168, 1995.
- ALEXANDER, M. **Introducción a la microbiología del suelo**. 2. ed. México: Libros y Editoriales, 1980. 491p.
- ALVES, A.G.C. **Relações da erosão do solo com a persistência e o manejo de resíduos culturais**. 1991. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- AMADO, T.J.C. **Relações da erosão hídrica do solo com níveis e formas de manejo do resíduo cultural de soja (*Glycine max* (L) Merr.), em condições de chuva simulada**. 1985. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.
- AMADO, T.J.C. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e preparo do solo**. 1997. 201 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.V.; BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total o solo e produtividade de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.679-686, 1999.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o 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.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.189-197, 2001.

- AMERICAN JOURNAL OF ALTERNATIVE AGRICULTURE. **Soil Quality**. Greenbelt: Institute for Alternative Agriculture, 1992. 93p. (Special Issue, v.7, n.1-2.)
- ANDREUX, F. Humus in world soils. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. p.1-44.
- ARSHAD, M.A.; COEN, G.M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.25-32, 1992.
- ATLAS R.M.; BARTHA R. **Microbial ecology: fundamentals and applications**. 4. ed. Menlo Park: Benjamin Cumming, 1997. 694p.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.28, n.9, p.1261-1263, 1996.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.53, n.3-4, p.215-230, 2000.
- BARNHISEL, R.I.; BERTSCH, P.M. Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.729-788. (Book Series, 1)
- BAYER, C. **Características químicas do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por métodos de preparo e sistemas de culturas**. 1992. 183 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.9-26.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.54, n.1-2, p.101-109, 2000a.
- 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, 2000b.

- BEARE, M.H.; HENDRIX, P.F.; COLEMAN, D.C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.3, p.777-786, 1994.
- BEARE, M.H.; COLEMAN, D.C.; CROSSLEY Jr, D.A.; HENDRIX, P.F.; ODUM, E.P. A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.170, n.1, p. 5-22, 1995.
- BERTOL, I. **Relações da erosão hídrica com métodos de preparo do solo, na ausência e na presença de cobertura por resíduo cultural de trigo**. 1986. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; SINGH, B.P.; TILL, A.R. Development and use of carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover. In: CADISH, G.; GILLER, K.E. (Eds.). **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**. London: CAB International, 1997. p.273-281.
- BOHLEN, P.J.; EDWARDS, C.A. The response of nematode trophic groups to organic and inorganic nutrient inputs in agroecosystems. 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.235-244. (Special Publication, 35)
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.79, n.1, p.37-45, 1999.
- BORCHARDT, G. Smectites. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.675-727. (Book Series, 1)
- BOUMA, J.; DROOGERS, P. A procedure to derive land quality indicators for sustainable agricultural production. **Geoderma**, Amsterdam, v.85, n.11, p.103-110, 1998.
- BRADFIELD, R. Soil conservation from viewpoint of soil physics. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v.29, n.2, p. 85-92, 1937.
- BRAGAGNOLO, N. **Efeito da cobertura do solo por resíduos de culturas sobre a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento do milho**. 1986. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30)

- BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; McCracken, R.J. **Soil genesis and classification**. Ames: The Iowa State University Press, 1973. 360p.
- BURLE, M.L. **Efeito de sistemas de culturas em características químicas do solo**. 1995. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- 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.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G.A.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p.69-90.
- CAPRA, F. **A Teia da Vida**. São Paulo: Editora Cultrix Ltda, 1996. 256p.
- CARTER, M.R. Organic matter and sustainability. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A. (Eds.) **Sustainable management of soil organic matter**. Wallingford: CABI Publishing, 2001. p.9-22.
- CARTER, M.R.; STEWART, B.A. **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Press, 1996. 472 p.
- CARVALHO, F.L.C. **Relações da erosão hídrica do solo com doses e formas de manejo do resíduo cultural de trigo**. 1986. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F.; GUERRA, M. Erodibilidade do solo “São Jerônimo” (Laterítico bruno avermelhado distrófico) determinada com simulador de chuvas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3., 1980, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1981. p.203-208.
- COLEMAN, D.C.; HENDRIX, P.F.; ODUM, E.P. Ecosystem health: an overview. In: HUANG, P.M. (Ed.). **Soil chemistry and ecosystem health**. Madison: Soil Science Society of America, 1998. p.1-20. (Special Publication, 52)
- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.425-432, 1999.
- CORNEJO, J.; HERMOSÍN, M.C. Interactions of humic substances and soil clays. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. p.595-624.
- DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. II. Total organic carbon

- and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.24, n.2, p.281-292, 1986.
- DICK, R.P. Soil enzyme activities as indicators of 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.107-124. (Special Publication, 35)
- DORAN, J.W. **On-farm measurement of soil quality indices**. Lincoln: USDA-ARS, University of Nebraska, 1994. Supplement to soil quality test kit (publicado em Sarrantonio et al, 1996).
- 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.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. 410p. (Special Publication, 49)
- 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.; 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.
- DOUGLAS, L.A. Vermiculites. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.635-674. (Book Series, 1)
- DREES, L.R.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; SENKAYI, A.L. Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.913-974. (Book Series, 1)
- DROOGERS, P.; BOUMA, J. Soil survey in exploratory modeling of sustainable soil management practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.6, p.1704-1710, 1997.
- DUIKER, S.W.; LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. **Soil And Tillage Research**, Oxford, v.54, n.1-2. p. 21-30, 2000.
- DUXBURY, J.M.; SMITH, M.S.; DORAN, J.W.; JORDAN, C.; SZOTT, L.; VANCE, E. Soil organic matter as a source and 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 Press, 1989. p.33-67.

- DUXBURY, J.M.; HARPER, L.A.; MOSIER, A.R. Contributions of agroecosystems to global climate change. In: HARPER, L.A.; MOSIER, A.R.; DUXBURY, J.M.; ROLSTON, D.E. (Eds.) **Agricultural ecosystems effects on trace gases and global climate change**. Madison: American Society of Agronomy, 1993, p.1-18. (Special Publication, 55)
- EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.18, n.1, p.64-73, 1967.
- ELLIOT, E.T.; BURKE, I.C.; MONZ, C.A.; FREY, S.D.; PAUSTIAN, K.H.; COLLINS, H.P.; PAUL, E.A.; COLE, C.V.; BLEVINS, R.L.; FRYE, W.W.; LYON, D.J.; HALVORSON, A.D.; HUGGINS, D.R.; TURCO, R.F.; HICKMAN, M.V. Terrestrial carbon pools in grasslands and agricultural soils: preliminary data from the Corn Belt and Great Plains regions. 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.179-191. (Special Publication, 35)
- ESPÍRITO SANTO, F.R.C. **Distribuição de óxidos de ferro em uma catena de solos derivados de granito na região fisiográfica da Depressão Central no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- FANNING, D.S.; KERAMIDAS, V.Z.; EL-DESOKY, M.A. Micas. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.551-634. (Book Series, 1)
- FAUCI, M.F.; DICK, R.P. Microbial biomass as an indicator of soil quality: effects of long-term management and recent soil amendments. 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.229-234. (Special Publication, 35)
- FERNANDES, F.F. **Uso do modelo Century para o estudo da dinâmica de carbono orgânico de solos do Rio Grande do Sul**. 2000. 19 f. Projeto Final de Pesquisa (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- FERNANDES, F.F.; MIELNICZUK, J. Simulação da dinâmica do carbono orgânico de solo do Rio Grande do Sul com o modelo Century. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28, 2001, Londrina. **Resumos...** Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. p.268.
- FERNANDES, S.B.V. **Disponibilidade e eficiência de uso do nitrogênio pelo milho em sistemas de cultura**. 1998. 137 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- FOSTER, S.M. Microbial aggregation of sand in an embryo dune system. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.11, n.5, p. 537-543, 1979.

- FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. In situ and potential CO₂ evolution from a Fluventic Ustochrept in southcentral Texas as affected by tillage and cropping intensity. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.47, n.3-4, p.303-308, 1998.
- FREITAS, V.H. **Eficiência de sistemas de preparo do solo e de culturas no fornecimento de nitrogênio para o milho**. 1988. 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- GAMEDA, S.; DUMANSKI, J. Framework for evaluation of sustainable land management: a case study of two rain-fed cereal-livestock farming systems in the Black Chernozemic soil zone of southern Alberta, Canada. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.75, n.4, p.429-437, 1995.
- GARLYND, M.J.; KARAKOV, A.V.; ROMIG, D.E.; HARRIS, R.F. Descriptive and analytical characterization of soil quality/health. 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.159-168. (Special Publication, 35)
- GLIESSMAN, S.R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 653 p.
- GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P. Soil structure and carbon cycle. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.32, n.5, p.1043-1068, 1994.
- GOLCHIN, A.; BALDOCK, J.A.; OADES, J.M. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p.245-266.
- GOMEZ, A.A.; KELLY, D.E.S.; SYERS, J.K.; COUGHLAN, K.J. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.401-410. (Special Publication, 49)
- GRANATSTEIN, D.; BEZDICEK, D.F. The need for a soil quality index: local and regional perspectives. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.12-16, 1992.
- GREENLAND, D.J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics – from myth to complex reality. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A. (Eds.) **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.17-33. (Special Publication, 29)
- GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M.; ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.74, n.4, p.367-385, 1994.

- GUPTA, V.V.S.R.; GERMIDA, J.J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, n.6, p.777-786, 1988.
- HARBERERN, J. A soil health index. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.47, n.1, 1992. (Editorial)
- HAYNES, R.J.; BEARE, M.H. Aggregation and organic matter storage in mesothermal, humid soils. In: In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.) **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.213-262.
- HARRIS, R.F.; BEZDICEK, D.F. Descriptive aspects of soil quality/health. 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.23-35. (Special Publication, 35)
- HARRIS, R.F.; CHESTERS, G.; ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. **Advances in Agronomy**, New York, v. 18, 1966. p.107-169.
- HEAL, O.W.; ANDERSON, J.M., SWIFT, M.J. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: CADISH, G.; GILLER, K.E. (Eds.) **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**. London: CAB International, 1997. p.3-30.
- HERRICK, J.E.; WANDER, M.M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: LAL, R; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 405-425.
- HERRICK, J.E. Soil quality: an indicator of sustainable land management? **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.15, n.1, p.75-83, 2000.
- HSU, P.H. Aluminum oxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.331-378. (Book Series, 1)
- HUFFMAN, E.; EILERS, R.G.; PADBURY G.; WALL, G.; MacDONALD, B. Canadian Agri-Environmental Indicators Related to Land Quality: Soil cover, Soil Erosion, Soil Salinity and Risk of Water Contamination. In: CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16, 1998, Montpellier. **Palestras...** Montpellier: Rural Development Sector – World Bank, 1998.
- IPAGRO – Instituto de Pesquisas Agronômicas. Seção de Ecologia Agrícola. **Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, v.3, 102f. 1989.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.79, n.1, p.9-16, 2000.

- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; GREGORICH, E.G.; ELLERT, B.H. Soil carbon dynamics in Canadian agroecosystems. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p.57-80.
- JASTROW, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.28, n.4-5, p.665-676, 1996.
- JASTROW, J.D.; MILLER, R.M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organo-mineral associations. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 207-223.
- JASTROW, J.D.; MILLER, R.M.; LUSSENHOP, J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.30, n.7, p.905-916, 1998.
- JENNY, H. Derivation of state factor equations of soils and ecosystems. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.25, n.5, p.385-388, 1961.
- KÄMPF, N. 1999. Iron oxides in tropical soils. In: FORMOSO, M. L. L.; CERRI, C. C. (Orgs) **Workshop on tropical soils**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1999. 192p.
- KARLEN, D.L.; EASH, N.S.; UNGER, P.W. Soil and crop management effects on soil quality indicators. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.48-55, 1992.
- KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of 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.53-72. (Special Publication, 35)
- KARLEN, D.L.; WOLLENHAUPT, N.C.; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.S., JORDAHL, J.L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.31, n.2-3, p.149-167, 1994a.
- KARLEN, D.L.; WOLLENHAUPT, N.C.; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.S., JORDAHL, J.L. Long-term tillage effects on soil quality. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.32, n.4, p.313-327, 1994b.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.4-10, 1997.
- KAY, B.D. Soil structure and organic carbon: a review. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998b. p.169-197.

- KENNEDY, A.C.; PAPENDICK, R.I. Microbial characteristics of soil quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.50, n.3, p.243-248, 1995.
- LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.27, n.1, p.1-8, 1993.
- LAL, R. Sustainable land use systems and soil resilience. In: GREENLAND, D.J.; SZABOLCS, I. (Eds.) **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB International, 1994. p.41-67.
- LAL, R. Residue management, conservation tillage and restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil and Tillage Research**, Oxford, v.43, n.1-2, p.81-107, 1997.
- LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998a. 609 p.
- LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F. Pedospheric processes and the carbon cycle. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998b. p.1-8.
- LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. 385 p.
- LAL, R.; PIERCE, F.J. The vanishing resource. In: LAL, R.; PIERCE, F.J. (Eds.) **Soil management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p.1-5.
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.37-51. (Special Publication, 35)
- LEVIEN, R. **Erosão na cultura do milho em diferentes sistemas de cultivo anterior e métodos de preparo do solo**. 1988. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- LIEBIG, M.A.; DORAN, J.W. Evaluation of point-scale assessments of soil quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.54, n.2, p.510-518, 1999.
- LINDEN, D.R.; HENDRIX, P.F.; COLEMAN, D.C.; van VLIET, P.C.J. Faunal indicators of 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.91-106. (Special Publication, 35)
- LOPES, P.R.C. **Relações da erosão com tipos e quantidades de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo**. 1984. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1984.

- LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001. 130 f. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- McQUAID, B.F.; OLSON, G.L. Soil quality indices of Piedmont sites under different management systems. In: LAL, R; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 427-433.
- MEDEIROS, J.C. **Sistemas de culturas adaptadas a produtividade, recuperação e conservação do solo**. 1985. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.
- MELLO, W.M.P. **Desenvolvimento do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo do solo**. 1991. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- MILLER, R.M.; JASTROW, J.D. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.22, n.5, p.579-584, 1990.
- MILLER, R.M.; JASTROW, J.D. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. In: BETHLENFALVAY, G.J.; LINDERMAN, R.G. (Eds.) **Mycorrhizae in sustainable agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1992. p.29-44. (Special Publications, 54)
- MONREAL, C.M.; DINEL, H.; SCHNITZER, M.; GAMBLE, D.S. Impact of carbon sequestration on functional indicators of soil quality as influenced by management in sustainable agriculture. In: LAL, R; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 435-457.
- MUNEER, M.; OADES, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. mechanisms and models. **Australian Journal Soil Science**, Collingwood, v.27, n.2, p.411-423, 1989.
- NELSON, D.L.; COX, M.M. **Lehninger principles of biochemistry**. 3. ed. New York: Worth Publishers, 2000. 1152p.
- NEVES, M.C.P. Como os microrganismos do solo obtêm energia e nutrientes. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Coords). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.17-31.
- NIELSEN, K.L.; LYNCH, J.P.; JABLOKOW, A.G.; CURTIS, P.S. Carbon cost of root systems: an architectural approach. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.165, n.1, p.161-169, 1994.

- NIKIFOROFF, C.C. Reappraisal of the soil. *Science*, Washington, v.129, n.3343, p.186-196, 1959.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.76, n.1-3, p.319-337, 1984.
- OADES, J.M. An introduction to organic matter in mineral soils. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.89-160. (Book Series, 1)
- OADES, J.M.; GILLMAN, G.P.; UEHARA, G.; HUE, N.V.; van NOORDWIJK, M.; ROBERTSON, G.P.; WADA, K. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. (Eds.) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: University of Hawaii Press, 1989. p.69-95.
- PANKHURST, C.E. Biological indicators of soil health and sustainable productivity. In: GREENLAND, D.J.; SZABOLCS, I. (Eds.) **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB International, 1994. p.331-351.
- PARR, J.F.; PAPENDICK, S.B.; HORNICK, S.B.; MEYER, R.E. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.5-11, 1992.
- PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.51, n.5, p.1173-1179, 1987.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1996. 340p.
- PAVINATO, A. **Teores de carbono e nitrogênio do solo e produtividade de milho afetados por sistemas de culturas**. 1993. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.
- PICCOLO, A. Humus and soil conservation. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. p.225-264.
- PRIGOGINE, I. **O fim das certezas**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1996. 199p.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **Entre o tempo e a eternidade**. São Paulo: Companhia das Letras, 1992. 226p.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança: metamorfose da ciência**. 3 ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1997. 247p.

- PULLEMAN, M.M.; BOUMA, J.; van ESSEN, E.A.; MEIJLES, E.W. Soil organic matter content as a function of different land use history. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n.2, p.689-693, 2000.
- RAIJ, van B. Propriedades eletroquímicas de solos. In: SEMINÁRIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 1986, Campinas. [Campinas: ESALQ/USP], 1986. p.9-40.
- 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.
- REICOSKY, D.C.; FORCELLA, F. Cover crop and soil quality interactions in agroecosystems. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.53, n.3, p.224-229, 1998.
- RICE, C.W.; MOORMAN, T.B.; BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.203-215. (Special Publication, 49)
- ROMIG, D.E.; GARYLAND, J.M.; HARRIS, R.F.; McSWEENEY, K. How farmers assess soil health and quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.50, n.3, p.229-236, 1995.
- ROMIG, D.E.; GARYLAND, J.M.; HARRIS, R.F. Farmer-based assessment of soil quality: a soil health scorecard. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.39-60. (Special Publication, 49)
- ROSSO, A. **Manejo de culturas de cobertura do solo no inverno e sua relação com a produtividade do milho**. 1989. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.
- SAIZ-JIMENEZ, C. The chemical structure of humic substances: recent advances. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. p.1-44.
- SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. **Fisiología Vegetal**. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1994. 758p.
- SANCHEZ, P.A.; PALM, C.A.; SZOTT, L.T.; CUEVAS, E.; LAL, R. Organic input management in tropical agroecosystems. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. (Eds.) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: University of Hawaii Press, 1989. p.125-152.
- SANDERS, D.W. International activities in assessing and monitoring soil degradation. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.17-24, 1992.

- SARRANTONIO, M.; DORAN, J.W.; LIEBIG, M.A.; HALVORSON, J.J. On-farm assessment of soil quality and health. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.83-105. (Special Publication, 49)
- SCHULZE, D.G. An introduction to soil mineralogy. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.1-34. (Book Series, 1)
- SCHWERTMANN, U; HERBILLON, A.J. Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. In: LAL, R; SANCHEZ, P.A. (Eds.) **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.47-59. (Special Publication, 29)
- SCHWERTMANN, U; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.380-438. (Book Series, 1)
- SEYBOLD, C.A.; MAUSBACH, M.J.; KARLEN, D.L.; ROGERS, H.H. Quantification of soil quality. In: LAL, R; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 387-404.
- SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Madison, v.164, n.4, p.224-234, 1999.
- SHERWOOD, S.; UPHOFF, N. Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.15, n.1, p. 85-97, 2000.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.2, p.313-319, 1997.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.311-317, 1998.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, J.W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, n.5, p.1367-1377, 1998.
- SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n.2, p.681-689, 2000.
- SMECK, N.E.; RUNGE, E.C.A.; MACKINTOSH, E.E. Dynamics and genetic modeling of soil systems. In: WILDING, L.P.; SMECK, N.E.; HALL, G.F. (Eds.) **Pedogenesis and soil taxonomy**. I. Concepts and interactions. Amsterdam: Elsevier Science, 1983, p. 51-81.

- SMITH, J.L., HALVORSON, J.J.; PAPENDICK, R.I. Multiple variable indicator kriging: a procedure for integrating soil quality indicators. 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.149-157. (Special Publication, 35)
- SMYTH, A.J.; DUMANSKI, J. A framework for evaluating sustainable land management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, n.4, p.401-406, 1995.
- SOIL AND TILLAGE RESEARCH. **Tillage and crop management impacts on soil carbon storage**. Amsterdam: Elsevier Science, v.47, n.3-4. 175p. 1998. (Special Issue)
- SOJKA, R.E.; UPCHURCH, D.R. Reservations regarding the soil quality concept. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.5, p.1039-1054, 1999.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2. ed. New York: J. Wiley, 1994. 496p.
- STORK, N.E.; EGGLETON, P. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.38-47, 1992.
- STRECK, E.V. **Erosão hídrica do solo relacionada com o subfator "PLU" – uso anterior da terra, do modelo RUSLE**. 1999. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. ver. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5)
- TEIXEIRA, L.A.J. **Fornecimento de nitrogênio ao milho por sistemas de culturas**. 1988. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- TESTA, V.M. **Características químicas de um Podzólico Vermelho-Escuro afetadas por sistemas de culturas, nutrição e rendimento do milho**. 1989. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.
- THOMAS, R.S.; DAKESSIAN, S.; AMES, R.N.; BROWN, M.S.; BETHLENFALVAY, G.J. Aggregation of a silty clay loam soil by mycorrhizal onion roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, n.6, p.1494-1499, 1986.

- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.33, n.2, p.141-163, 1982.
- TISDALL, J.M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.159, n.1, p.115-121, 1994.
- TISDALL, J.M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.) **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.57-96.
- TSAI, S.M.; BARAIBAR, A.V.L.; ROMANI, V.L.M. Efeito de fatores do solo. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Coords). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.59-72.
- TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C., JAWSON, M.D. Microbial indicators of 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.73-90. (Special Publication, 35)
- VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p. 35-42, 2000.
- VIEIRA, J.M. **Perdas por erosão sob diferentes sistemas de preparo do solo para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.), em condições de chuva simulada**. 1977. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.
- VISSER, S.; PARKINSON, D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: soil microorganisms. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v.7, n.1-2, p.33-37, 1992.
- WANG, X.; GONG, Z. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. **Geoderma**, Amsterdam, v.81, n.3-4, p.339-355, 1998.
- ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T.M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.1-4, p.117-161, 1997.
- ZINCK, J.A.; FARSHAD, A. Issues of sustainability and sustainable land management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, n.4, p.407-412, 1995.

8. APÊNDICES

APÊNDICE 1. Arquivo dos parâmetros locais utilizados para obter o arquivo “base” e os sistemas solo do Estudo 1 nas simulações do modelo Century 4.0.

*** Climate parameters 1911-present	27.0	TMX2M(11)	
14.9	PRECIP(1)	29.4	TMX2M(12)
10.4	PRECIP(2)	*** Site and control parameters	
8.8	PRECIP(3)	0	IVAUTO
10.2	PRECIP(4)	1.0	NELEM
11.4	PRECIP(5)	-30.0167	SITLAT
13.7	PRECIP(6)	51.22	SITLNG
12.7	PRECIP(7)	0.525	SAND
11.2	PRECIP(8)	0.250	SILT
12.4	PRECIP(9)	0.225	CLAY
14.9	PRECIP(10)	1.54	BULKD
16.5	PRECIP(11)	5.0	NLAYER
17.9	PRECIP(12)	5.0	NLAYPG
0	PRCSTD(1)	0.5	DRAIN
0	PRCSTD(2)	0.3	BASEF
0	PRCSTD(3)	0.6	STORMF
0	PRCSTD(4)	3.0	SWFLAG
0	PRCSTD(5)	0.2	AWILT(1)
0	PRCSTD(6)	0.2	AWILT(2)
0	PRCSTD(7)	0.2	AWILT(3)
0	PRCSTD(8)	0.2	AWILT(4)
0	PRCSTD(9)	0.2	AWILT(5)
0	PRCSTD(10)	0.2	AWILT(6)
0	PRCSTD(11)	0.2	AWILT(7)
0	PRCSTD(12)	0.2	AWILT(8)
0	PRCSKW(1)	0.2	AWILT(9)
0	PRCSKW(2)	0.2	AWILT(10)
0	PRCSKW(3)	0.4	AFIEL(1)
0	PRCSKW(4)	0.4	AFIEL(2)
0	PRCSKW(5)	0.4	AFIEL(3)
0	PRCSKW(6)	0.4	AFIEL(4)
0	PRCSKW(7)	0.4	AFIEL(5)
0	PRCSKW(8)	0.4	AFIEL(6)
0	PRCSKW(9)	0.4	AFIEL(7)
0	PRCSKW(10)	0.4	AFIEL(8)
0	PRCSKW(11)	0.4	AFIEL(9)
0	PRCSKW(12)	0.4	AFIEL(10)
20.1	TMN2M(1)	5.1	PH
20.1	TMN2M(2)	1.0	PSLSRB
18.8	TMN2M(3)	100.0	SORPMX
15.5	TMN2M(4)	*** External nutrient input parameters	
12.9	TMN2M(5)	0.21	EPNFA(1)
11.0	TMN2M(6)	0.0028	EPNFA(2)
9.9	TMN2M(7)	-0.92	EPNFS(1)
10.9	TMN2M(8)	0.028	EPNFS(2)
12.8	TMN2M(9)	0.0	SATMOS(1)
14.9	TMN2M(10)	0.0	SATMOS(2)
16.5	TMN2M(11)	0.0	SIRRI
18.4	TMN2M(12)	*** Organic matter initial values	
30.7	TMX2M(1)	0.001	SOM1CI(1,1)
30.1	TMX2M(2)	0.0	SOM1CI(1,2)
29.0	TMX2M(3)	0.001	SOM1CI(2,1)
25.3	TMX2M(4)	0.0	SOM1CI(2,2)
22.3	TMX2M(5)	0.0010	SOM2CI(1)
20.0	TMX2M(6)	0.0	SOM2CI(2)
19.6	TMX2M(7)	0.001	SOM3CI(1)
20.9	TMX2M(8)	0.0	SOM3CI(2)
21.8	TMX2M(9)	0.001	RCES1(1,1)
24.2	TMX2M(10)		

APÊNDICE 1. Continuação.

0.001	RCES1(1,2)	0.0	CROOTE(3)
0.001	RCES1(1,3)	0.0	WD1CIS(1)
0.001	RCES1(2,1)	0.0	WD1CIS(2)
0.001	RCES1(2,2)	0.0	WD2CIS(1)
0.001	RCES1(2,3)	0.0	WD2CIS(2)
0.001	RCES2(1)	0.0	WD3CIS(1)
0.001	RCES2(2)	0.0	WD3CIS(2)
0.001	RCES2(3)	0.3	W1LIG
0.001	RCES3(1)	0.3	W2LIG
0.001	RCES3(2)	0.3	W3LIG
0.001	RCES3(3)		*** Mineral initial parameters
0.001	CLITTR(1,1)	0.001	MINERL(1,1)
0.0	CLITTR(1,2)	0.001	MINERL(2,1)
0.001	CLITTR(2,1)	0.001	MINERL(3,1)
0.0	CLITTR(2,2)	0.001	MINERL(4,1)
0.001	RCELIT(1,1)	0.001	MINERL(5,1)
0.001	RCELIT(1,2)	0.001	MINERL(6,1)
0.001	RCELIT(1,3)	0.0	MINERL(7,1)
0.001	RCELIT(2,1)	0.0	MINERL(8,1)
0.001	RCELIT(2,2)	0.0	MINERL(9,1)
0.001	RCELIT(2,3)	0.0	MINERL(10,1)
0.001	AGLCIS(1)	0.001	MINERL(1,2)
0.0	AGLCIS(2)	0.0	MINERL(2,2)
0.001	AGLIVE(1)	0.0	MINERL(3,2)
0.001	AGLIVE(2)	0.0	MINERL(4,2)
0.0	AGLIVE(3)	0.0	MINERL(5,2)
0.001	BGLCIS(1)	0.0	MINERL(6,2)
0.0	BGLCIS(2)	0.0	MINERL(7,2)
0.001	BGLIVE(1)	0.0	MINERL(8,2)
0.001	BGLIVE(2)	0.0	MINERL(9,2)
0.001	BGLIVE(3)	0.0	MINERL(10,2)
0.001	STDCIS(1)	0.5	MINERL(1,3)
0.0	STDCIS(2)	0.0	MINERL(2,3)
.30	STDEDE(1)	0.0	MINERL(3,3)
0.05	STDEDE(2)	0.0	MINERL(4,3)
0.1	STDEDE(3)	0.0	MINERL(5,3)
	*** Forest organic matter initial parameters	0.0	MINERL(6,3)
0.0	RLVCIS(1)	0.0	MINERL(7,3)
0.0	RLVCIS(2)	0.0	MINERL(8,3)
0.0	RLEAVE(1)	0.0	MINERL(9,3)
0.0	RLEAVE(2)	0.0	MINERL(10,3)
0.0	RLEAVE(3)	0.0	PARENT(1)
0.0	FBRCIS(1)	0.0	PARENT(2)
0.0	FBRCIS(2)	0.0	PARENT(3)
0.0	FBRCHE(1)	0.0	SECNDY(1)
0.0	FBRCHE(2)	0.0	SECNDY(2)
0.0	FBRCHE(3)	0.0	SECNDY(3)
0.0	RLWCIS(1)	0.0	OCCLUD
0.0	RLWCIS(2)		*** Water initial parameters
0.0	RLWODE(1)	0.0	RWCF(1)
0.0	RLWODE(2)	0.0	RWCF(2)
0.0	RLWODE(3)	0.0	RWCF(3)
0.0	FRTCIS(1)	0.0	RWCF(4)
0.0	FRTCIS(2)	0.0	RWCF(5)
0.0	FROOTE(1)	0.0	RWCF(6)
0.0	FROOTE(2)	0.0	RWCF(7)
0.0	FROOTE(3)	0.0	RWCF(8)
0.0	CRTCIS(1)	0.0	RWCF(9)
0.0	CRTCIS(2)	0.0	RWCF(10)
0.0	CROOTE(1)	0.0	SNLQ
0.0	CROOTE(2)	0.0	SNOW

APÊNDICE 2. Arquivos FIX.100 utilizados para obter os arquivos “equilíbrio” e “base” e os sistemas solo do Estudo 1 nas simulações do modelo Century 4.0.

Os valores dos parâmetros listados abaixo se referem aos utilizados para os arquivos “equilíbrio”, “base” e o sistema *campo nativo*. Para os sistemas *pc am*, *pc avmc* os parâmetros DEC5 e P1CO2B(2) foram alterados para 0,26 e 0,72, respectivamente. Para os sistemas *sd am* e *sd avmc* os parâmetros DEC5 e P1CO2B(2) foram alterados para 0,16 e 0,60, respectivamente, conforme explanado no item 4.1. Materiais e Métodos do Estudo 1.

X	Fixed_values	7.30000	'DEC3(2)'
15.00000	'ADEP(1)'	0.00450	'DEC4'
15.00000	'ADEP(2)'	0.20000	'DEC5'
15.00000	'ADEP(3)'	5.00000	'DECK5'
15.00000	'ADEP(4)'	-4.00000	'DLIGDF'
30.00000	'ADEP(5)'	0.99900	'DRESP'
30.00000	'ADEP(6)'	0.20000	'EDEPTH'
30.00000	'ADEP(7)'	0.40000	'ELITST'
30.00000	'ADEP(8)'	2.00000	'ENRICH'
0.00000	'ADEP(9)'	0.90000	'FAVAIL(1)'
0.00000	'ADEP(10)'	0.50000	'FAVAIL(3)'
-40.00000	'AGPPA'	0.20000	'FAVAIL(4)'
7.70000	'AGPPB'	0.40000	'FAVAIL(5)'
1.50000	'ANEREF(1)'	2.00000	'FAVAIL(6)'
3.00000	'ANEREF(2)'	0.20000	'FLEACH(1)'
0.30000	'ANEREF(3)'	0.70000	'FLEACH(2)'
5.00000	'ANIMPT'	1.00000	'FLEACH(3)'
0.80000	'AWTL(1)'	0.00000	'FLEACH(4)'
0.60000	'AWTL(2)'	0.10000	'FLEACH(5)'
0.40000	'AWTL(3)'	0.80000	'FWLOSS(1)'
0.30000	'AWTL(4)'	0.80000	'FWLOSS(2)'
0.20000	'AWTL(5)'	0.65000	'FWLOSS(3)'
0.20000	'AWTL(6)'	0.90000	'FWLOSS(4)'
0.20000	'AWTL(7)'	-0.12500	'FXMCA'
0.20000	'AWTL(8)'	0.00500	'FXMCB'
0.00000	'AWTL(9)'	0.35000	'FXMXS'
0.00000	'AWTL(10)'	7.00000	'FXNPB'
100.00000	'BGPPA'	0.00000	'GREMB'
7.00000	'BGPPB'	2.00000	'IDEF'
350.00000	'CO2PPM(1)'	0.20000	'LHZF(1)'
700.00000	'CO2PPM(2)'	0.40000	'LHZF(2)'
0.00000	'CO2RMP'	0.80000	'LHZF(3)'
0.00000	'DAMR(1,1)'	18.00000	'MINLCH'
0.00000	'DAMR(1,2)'	0.00000	'NSNFIK'
0.01000	'DAMR(1,3)'	4.00000	'NTSPM'
0.02000	'DAMR(2,1)'	0.03000	'OMLECH(1)'
0.02000	'DAMR(2,2)'	0.12000	'OMLECH(2)'
0.04000	'DAMR(2,3)'	60.00000	'OMLECH(3)'
15.00000	'DAMRMN(1)'	0.60000	'P1CO2A(1)'
150.00000	'DAMRMN(2)'	0.17000	'P1CO2A(2)'
150.00000	'DAMRMN(3)'	0.00000	'P1CO2B(1)'
3.90000	'DEC1(1)'	0.68000	'P1CO2B(2)'
4.90000	'DEC1(2)'	0.55000	'P2CO2'
14.80000	'DEC2(1)'	0.55000	'P3CO2'
18.50000	'DEC2(2)'	100.00000	'PABRES'
6.00000	'DEC3(1)'	16.00000	'PCEMIC(1,1)'

APÊNDICE 2. Continuação.

200.00000	'PCEMIC(1,2)'	500.00000	'RCESTR(3)'
150.00000	'PCEMIC(1,3)'	0.01500	'RICTRL'
10.00000	'PCEMIC(2,1)'	0.80000	'RIINT'
99.00000	'PCEMIC(2,2)'	0.30000	'RSPLIG'
50.00000	'PCEMIC(2,3)'	-1.00000	'SEED'
0.02000	'PCEMIC(3,1)'	0.85000	'SPL(1)'
0.00150	'PCEMIC(3,2)'	0.01300	'SPL(2)'
0.00150	'PCEMIC(3,3)'	5000.00000	'STRMAX(1)'
0.25000	'PEFTXA'	5000.00000	'STRMAX(2)'
0.75000	'PEFTXB'	1.00000	'TEXEPP(1)'
6.00000	'PHESP(1)'	0.70000	'TEXEPP(2)'
0.00080	'PHESP(2)'	0.00010	'TEXEPP(3)'
7.60000	'PHESP(3)'	0.00016	'TEXEPP(4)'
0.01500	'PHESP(4)'	2.00000	'TEXEPP(5)'
3.00000	'PLIGST(1)'	1.00000	'TEXESP(1)'
3.00000	'PLIGST(2)'	0.00400	'TEXESP(3)'
0.55000	'PMCO2(1)'	0.00000	'TEFF(1)'
0.55000	'PMCO2(2)'	0.12500	'TEFF(2)'
0.00000	'PMNSEC(1)'	0.07000	'TEFF(3)'
0.00000	'PMNSEC(2)'	-8.00000	'TMELT(1)'
2.00000	'PMNSEC(3)'	4.00000	'TMELT(2)'
0.00400	'PMNTMP'	14.00000	'VARAT1(1,1)'
600.00000	'PMXBIO'	3.00000	'VARAT1(2,1)'
-0.00350	'PMXTMP'	2.00000	'VARAT1(3,1)'
0.00000	'PPARMN(1)'	150.00000	'VARAT1(1,2)'
0.00010	'PPARMN(2)'	30.00000	'VARAT1(2,2)'
0.00050	'PPARMN(3)'	2.00000	'VARAT1(3,2)'
0.00000	'PPRPTS(1)'	200.00000	'VARAT1(1,3)'
1.00000	'PPRPTS(2)'	50.00000	'VARAT1(2,3)'
0.80000	'PPRPTS(3)'	2.00000	'VARAT1(3,3)'
0.45000	'PS1CO2(1)'	20.00000	'VARAT2(1,1)'
0.55000	'PS1CO2(2)'	12.00000	'VARAT2(2,1)'
0.00300	'PS1S3(1)'	2.00000	'VARAT2(3,1)'
0.03200	'PS1S3(2)'	400.00000	'VARAT2(1,2)'
0.00300	'PS2S3(1)'	100.00000	'VARAT2(2,2)'
0.00900	'PS2S3(2)'	2.00000	'VARAT2(3,2)'
0.00000	'PSECMN(1)'	400.00000	'VARAT2(1,3)'
0.00220	'PSECMN(2)'	100.00000	'VARAT2(2,3)'
0.20000	'PSECMN(3)'	2.00000	'VARAT2(3,3)'
0.00000	'PSECOG'	8.00000	'VARAT3(1,1)'
12.00000	'RAD1P(1,1)'	6.00000	'VARAT3(2,1)'
3.00000	'RAD1P(2,1)'	2.00000	'VARAT3(3,1)'
5.00000	'RAD1P(3,1)'	200.00000	'VARAT3(1,2)'
220.000000	'RAD1P(1,2)'	50.00000	'VARAT3(2,2)'
5.00000	'RAD1P(2,2)'	2.00000	'VARAT3(3,2)'
100.00000	'RAD1P(3,2)'	200.00000	'VARAT3(1,3)'
220.000000	'RAD1P(1,3)'	50.00000	'VARAT3(2,3)'
5.00000	'RAD1P(2,3)'	2.00000	'VARAT3(3,3)'
100.00000	'RAD1P(3,3)'	0.02000	'VLOSSE'
200.00000	'RCESTR(1)'	0.01000	'VLOSSG'
500.00000	'RCESTR(2)'		

Fix.100 de mesic/subhumid grassland

APÊNDICE 3. Cenários dos arquivos “equilíbrio” e “base” e dos sistemas solo utilizados nas simulações do modelo Century 4.0 para o Estudo 1.

Cenário EQUILÍBRIO:

```

0      Starting year
6000   Last year
sjeq.100  Site file name
0      Labeling type
-1     Labeling year
-1.00  Microcosm
-1     CO2 Systems
1      Initial system
CN1    Initial crop
       Initial tree
Year Month Option
1      Block # Grassland, COM PASTEJO baixo, sem efeito linear
6000   Last year
1      Repeats # years
0      Output starting year
1      Output month
500.0  Output interval
M      Weather choice
  1 1 CROP CN1
  1 1 GRAZ GM 2 GRAZ GM 3 GRAZ GM 4 GRAZ GM 5 GRAZ GM 6 GRAZ GM 7 GRAZ GM
  1 8 GRAZ GM 9 FRST 9 GRAZ GM 10 GRAZ GM 11 GRAZ GM 12 GRAZ GM
-999 -999 X

```

Cenário BASE:

```

1900   Starting year
1984   Last year
sjbasea.100  Site file name
0      Labeling type
-1     Labeling year
-1.00  Microcosm
-1     CO2 Systems
1      Initial system
CN1A   Initial crop
       Initial tree
Year Month Option
1      Block #
1984   Last year
1      Repeats # years
1900   Output starting year
1      Output month
0.0833  Output interval
M      Weather choice
  1 1 CROP CN1A
  1 1 GRAZ GM 2 GRAZ GM 3 GRAZ GM 4 GRAZ GM 5 GRAZ GM 6 GRAZ GM 7 GRAZ GM
  1 8 GRAZ GM 9 FRST 9 GRAZ GM 10 GRAZ GM 11 GRAZ GM 12 GRAZ GM
-999 -999 X

```

APÊNDICE 3. Continuação.

Cenário CAMPO NATIVO:

1900 Starting year
 2150 Last year
 sjbase.100 Site file name
 0 Labeling type
 -1 Labeling year
 -1.00 Microcosm
 -1 CO2 Systems
 1 Initial system
 CN1 Initial crop
 Initial tree
 Year Month Option
 1 Block #
 2150 Last year
 1 Repeats # years
 1900 Output starting year
 1 Output month
 0.0833 Output interval
 M Weather choice
 1 1 CROP CN1
 1 1 GRAZ GM 2 GRAZ GM 3 GRAZ GM 4 GRAZ GM 5 GRAZ GM 6 GRAZ GM 7 GRAZ GM
 1 8 GRAZ GM 9 FRST 9 GRAZ GM 10 GRAZ GM 11 GRAZ GM 12 GRAZ GM
 -999 -999 X

Cenário PREPARO CONVENCIONAL AVEIA/MILHO:

1985 Starting year
 2150 Last year
 sjbasea.100 Site file name
 0 Labeling type
 -1 Labeling year
 -1.00 Microcosm
 -1 CO2 Systems
 1 Initial system
 APCAMCOE Initial crop
 Initial tree
 Year Month Option
 1 Block #
 2150 Last year
 1 Repeats # years
 1985 Output starting year
 1 Output month
 0.0833 Output interval
 M Weather choice
 1 1 CROP APCAMCOE
 1 2 LAST 2 HARV G 3 CULT H 3 CULT RF 4 CROP APCAMCOE 4 PLTM 4 CULT N
 1 9 LAST 9 CULT P 10 CROP MPCAMCOE 10 PLTM
 1 10 CULT D 12 EROD 0.01
 -999 -999 X

APÊNDICE 3. Continuação.

Cenário PREPARO CONVENCIONAL AVEIA+VICA/MILHO+CAUPI:

1985 Starting year
 2150 Last year
 sjbasea.100 Site file name
 0 Labeling type
 -1 Labeling year
 -1.00 Microcosm
 -1 CO2 Systems
 1 Initial system
 PDCOEAV Initial crop
 Initial tree
 Year Month Option
 1 Block #
 2150 Last year
 1 Repeats # years
 1985 Output starting year
 1 Output month
 0.0833 Output interval
 M Weather choice
 1 1 CROP PDCOEAV
 1 2 LAST 2 HARV G 3 CULT H 3 CULT RF 4 CROP PDCOEAV 4 PLTM 4 CULT N
 1 4 FERT N1 5 FERT N1 9 LAST 9 CULT P 10 CROP MCPDCE 10 PLTM
 1 10 CULT D 10 FERT N45 12 EROD 0.01
 -999 -999 X

Cenário SEMEADURA DIRETA AVEIA/MILHO:

1985 Starting year
 2150 Last year
 sjbasea.100 Site file name
 0 Labeling type
 -1 Labeling year
 -1.00 Microcosm
 -1 CO2 Systems
 1 Initial system
 APCAMCOE Initial crop
 Initial tree
 Year Month Option
 1 Block #
 2150 Last year
 1 Repeats # years
 1985 Output starting year
 1 Output month
 0.0833 Output interval
 M Weather choice
 1 1 CROP APCAMCOE
 1 2 LAST 2 HARV G 3 CULT H 3 CULT RF 4 CROP APCAMCOE 4 PLTM 4 CULT N
 1 4 FERT N1 9 LAST 9 CULT H 9 CULT RF 10 CROP MPCAMCOE 10 PLTM
 1 10 CULT N 12 EROD 0.01
 -999 -999 X

APÊNDICE 3. Continuação.

Cenário SEMEADURA DIRETA AVEIA+VICA/MILHO+CAUPI:

1985 Starting year
 2150 Last year
 sjbasea.100 Site file name
 0 Labeling type
 -1 Labeling year
 -1.00 Microcosm
 -1 CO2 Systems
 1 Initial system
 PDCOEAV Initial crop
 Initial tree
 Year Month Option
 1 Block #
 2150 Last year
 1 Repeats # years
 1985 Output starting year
 1 Output month
 0.0833 Output interval
 M Weather choice
 1 1 CROP PDCOEAV
 1 2 LAST 2 HARV G 3 CULT H 3 CULT RF 4 CROP PDCOEAV 4 PLTM 4 CULT N
 1 4 FERT N3 5 FERT N1 9 LAST 9 CULT H 9 CULT RF 10 CROP MCPDCOE 10 PLTM
 1 10 CULT N 10 FERT N3 11 FERT N1 12 EROD 0.01
 -999 -999 X

APÊNDICE 4. Parâmetros dos comandos utilizados nos cenários dos arquivos “equilíbrio” e “base” e dos sistemas solo simulados no modelo Century 4.0 para o Estudo 1.

Pastejo: GRAZ		N	NO-TILL-DRILL
GM		0.05000	'CULTRA (1) '
0.10000	'FLGREM'	0.05000	'CULTRA (2) '
0.01000	'FDGREM'	0.00000	'CULTRA (3) '
0.30000	'GFCRET'	0.05000	'CULTRA (4) '
0.90000	'GRET (1) '	0.05000	'CULTRA (5) '
0.95000	'GRET (2) '	0.05000	'CULTRA (6) '
0.95000	'GRET (3) '	0.10000	'CULTRA (7) '
1.00000	'GRZEFF'	1.00000	'CLTEFF (1) '
0.50000	'FECF (1) '	1.00000	'CLTEFF (2) '
0.90000	'FECF (2) '	1.00000	'CLTEFF (3) '
0.50000	'FECF (3) '	1.00000	'CLTEFF (4) '
0.25000	'FECLIG'		
Colheita: HARV		H	HERBICIDE
G	GRAIN_	1.00000	'CULTRA (1) '
0.00000	'AGLREM'	0.00000	'CULTRA (2) '
0.00000	'BGLREM'	0.00000	'CULTRA (3) '
1.00000	'FLGHRV'	0.00000	'CULTRA (4) '
0.00000	'RMVSTR'	0.00000	'CULTRA (5) '
0.50000	'REMWSO'	0.00000	'CULTRA (6) '
0.00000	'HIBG'	0.00000	'CULTRA (7) '
		1.00000	'CLTEFF (1) '
		1.00000	'CLTEFF (2) '
		1.00000	'CLTEFF (3) '
		1.00000	'CLTEFF (4) '
Preparo de Solo: CULT		RF	ROLO FACA
P	PLOWING	0.00000	'CULTRA (1) '
0.00000	'CULTRA (1) '	1.00000	'CULTRA (2) '
0.10000	'CULTRA (2) '	0.00000	'CULTRA (3) '
0.90000	'CULTRA (3) '	1.00000	'CULTRA (4) '
0.10000	'CULTRA (4) '	0.00000	'CULTRA (5) '
0.90000	'CULTRA (5) '	0.00000	'CULTRA (6) '
0.90000	'CULTRA (6) '	0.00000	'CULTRA (7) '
0.90000	'CULTRA (7) '	1.00000	'CLTEFF (1) '
1.00000	'CLTEFF (1) '	1.00000	'CLTEFF (2) '
1.60000	'CLTEFF (2) '	1.00000	'CLTEFF (3) '
1.60000	'CLTEFF (3) '	1.00000	'CLTEFF (4) '
1.60000	'CLTEFF (4) '		
D	DRILL		
0.05000	'CULTRA (1) '		
0.05000	'CULTRA (2) '		
0.10000	'CULTRA (3) '		
0.05000	'CULTRA (4) '		
0.15000	'CULTRA (5) '		
0.20000	'CULTRA (6) '		
0.20000	'CULTRA (7) '		
1.10000	'CLTEFF (1) '		
1.10000	'CLTEFF (2) '		
1.10000	'CLTEFF (3) '		
1.10000	'CLTEFF (4) '		
Adubação: FERT			
N45	Nitrogen__4.5_gN/m2		
4.50000	'FERAMT (1) '		
0.00000	'FERAMT (2) '		
0.00000	'FERAMT (3) '		
0.00000	'AUFERT'		
N3	Nitrogen__3_gN/m2		
3.00000	'FERAMT (1) '		
0.00000	'FERAMT (2) '		
0.00000	'FERAMT (3) '		
0.00000	'AUFERT'		
N1	Nitrogen__1gN/m2		
1.00000	'FERAMT (1) '		
0.00000	'FERAMT (2) '		
0.00000	'FERAMT (3) '		
0.00000	'AUFERT'		

APÊNDICE 5. Parâmetros de culturas utilizadas nos cenários dos arquivos “equilíbrio” e “base” e dos sistemas solo simulados no modelo Century 4.0 para o Estudo 1.

CN1	campo nativo	150.0	'FSDETH(4)'
149.6	'PRDX(1)'	0.15	'FALLRT'
27.0	'PPDF(1)'	0.15	'RDR'
45.0	'PPDF(2)'	2.0	'RTDTMP'
1.0	'PPDF(3)'	0.30	'CRPRTF(1)'
3.0	'PPDF(4)'	0.0	'CRPRTF(2)'
0.0	'BIOFLG'	0.0	'CRPRTF(3)'
60.0	'BIOK5'	0.0	'SNFXMX(1)'
1.0	'PLTMRP'	-18.0	'DEL13C'
100.0	'FULCAN'	1.075	'CO2IPR(1)'
0.0	'FRTC(1)'	0.77	'CO2ITR(1)'
0.0	'FRTC(2)'	1.0	'CO2ICE(1,1,1)'
0.0	'FRTC(3)'	1.0	'CO2ICE(1,1,2)'
400.0	'BIOMAX'	1.0	'CO2ICE(1,1,3)'
30.0	'PRAMN(1,1)'	1.075	'CO2ICE(1,2,1)'
390.0	'PRAMN(2,1)'	1.0	'CO2ICE(1,2,2)'
340.0	'PRAMN(3,1)'	1.0	'CO2ICE(1,2,3)'
90.0	'PRAMN(1,2)'	1.0	'CO2IRS(1)'
390.0	'PRAMN(2,2)'		
340.0	'PRAMN(3,2)'		
35.0	'PRAMX(1,1)'	CN1A	campo nativo "base"
440.0	'PRAMX(2,1)'	119.5	'PRDX(1)'
440.0	'PRAMX(3,1)'	27.0	'PPDF(1)'
95.0	'PRAMX(1,2)'	45.0	'PPDF(2)'
440.0	'PRAMX(2,2)'	1.0	'PPDF(3)'
440.0	'PRAMX(3,2)'	3.0	'PPDF(4)'
50.0	'PRBMN(1,1)'	0.0	'BIOFLG'
390.0	'PRBMN(2,1)'	60.0	'BIOK5'
340.0	'PRBMN(3,1)'	1.0	'PLTMRP'
0.0	'PRBMN(1,2)'	100.0	'FULCAN'
0.0	'PRBMN(2,2)'	0.0	'FRTC(1)'
0.0	'PRBMN(3,2)'	0.0	'FRTC(2)'
55.0	'PRBMX(1,1)'	0.0	'FRTC(3)'
420.0	'PRBMX(2,1)'	400.0	'BIOMAX'
420.0	'PRBMX(3,1)'	30.0	'PRAMN(1,1)'
0.0	'PRBMX(1,2)'	390.0	'PRAMN(2,1)'
0.0	'PRBMX(2,2)'	340.0	'PRAMN(3,1)'
0.0	'PRBMX(3,2)'	90.0	'PRAMN(1,2)'
0.02	'FLIGNI(1,1)'	390.0	'PRAMN(2,2)'
0.0012	'FLIGNI(2,1)'	340.0	'PRAMN(3,2)'
0.26	'FLIGNI(1,2)'	35.0	'PRAMX(1,1)'
-0.0015	'FLIGNI(2,2)'	440.0	'PRAMX(2,1)'
0.0	'HIMAX'	440.0	'PRAMX(3,1)'
0.0	'HIWSF'	95.0	'PRAMX(1,2)'
2.0	'HIMON(1)'	440.0	'PRAMX(2,2)'
1.0	'HIMON(2)'	440.0	'PRAMX(3,2)'
0.0	'EFRGRN(1)'	50.0	'PRBMN(1,1)'
0.0	'EFRGRN(2)'	390.0	'PRBMN(2,1)'
0.0	'EFRGRN(3)'	340.0	'PRBMN(3,1)'
0.15	'VLOSSP'	0.0	'PRBMN(1,2)'
0.2	'FSDETH(1)'	0.0	'PRBMN(2,2)'
0.95	'FSDETH(2)'	0.0	'PRBMN(3,2)'
0.2	'FSDETH(3)'	55.0	'PRBMX(1,1)'
		420.0	'PRBMX(2,1)'

APÊNDICE 5. Continuação.

420.0	'PRBMX (3,1)'	200.0	'PRAMN (3,2)'
0.0	'PRBMX (1,2)'	25.0	'PRAMX (1,1)'
0.0	'PRBMX (2,2)'	200.0	'PRAMX (2,1)'
0.0	'PRBMX (3,2)'	230.0	'PRAMX (3,1)'
0.02	'FLIGNI (1,1)'	100.0	'PRAMX (1,2)'
0.0012	'FLIGNI (2,1)'	260.0	'PRAMX (2,2)'
0.26	'FLIGNI (1,2)'	270.0	'PRAMX (3,2)'
-0.0015	'FLIGNI (2,2)'	45.0	'PRBMN (1,1)'
0.0	'HIMAX'	390.0	'PRBMN (2,1)'
0.0	'HIWSF'	340.0	'PRBMN (3,1)'
2.0	'HIMON (1)'	0.0	'PRBMN (1,2)'
1.0	'HIMON (2)'	0.0	'PRBMN (2,2)'
0.0	'EFRGRN (1)'	0.0	'PRBMN (3,2)'
0.0	'EFRGRN (2)'	60.0	'PRBMX (1,1)'
0.0	'EFRGRN (3)'	420.0	'PRBMX (2,1)'
0.15	'VLOSSP'	420.0	'PRBMX (3,1)'
0.2	'FSDETH (1)'	0.0	'PRBMX (1,2)'
0.95	'FSDETH (2)'	0.0	'PRBMX (2,2)'
0.2	'FSDETH (3)'	0.0	'PRBMX (3,2)'
150.0	'FSDETH (4)'	0.15	'FLIGNI (1,1)'
0.15	'FALLRT'	0.0	'FLIGNI (2,1)'
0.15	'RDR'	0.06	'FLIGNI (1,2)'
2.0	'RTDTMP'	0.0	'FLIGNI (2,2)'
0.30	'CRPRTF (1)'	0.35	'HIMAX'
0.0	'CRPRTF (2)'	0.0	'HIWSF'
0.0	'CRPRTF (3)'	1.0	'HIMON (1)'
0.0	'SNFXMX (1)'	1.0	'HIMON (2)'
-18.0	'DEL13C'	0.6	'EFRGRN (1)'
1.075	'CO2IPR (1)'	0.6	'EFRGRN (2)'
0.77	'CO2ITR (1)'	0.6	'EFRGRN (3)'
1.0	'CO2ICE (1,1,1)'	0.04	'VLOSSP'
1.0	'CO2ICE (1,1,2)'	0.0	'FSDETH (1)'
1.0	'CO2ICE (1,1,3)'	0.0	'FSDETH (2)'
1.075	'CO2ICE (1,2,1)'	0.0	'FSDETH (3)'
1.0	'CO2ICE (1,2,2)'	200.0	'FSDETH (4)'
1.0	'CO2ICE (1,2,3)'	0.12	'FALLRT'
1.0	'CO2IRS (1)'	0.05	'RDR'
		2.0	'RTDTMP'
APCAMCOE	aveia	0.0	'CRPRTF (1)'
120.0	'PRDX (1)'	0.0	'CRPRTF (2)'
18.0	'PPDF (1)'	0.0	'CRPRTF (3)'
35.0	'PPDF (2)'	0.0	'SNFXMX (1)'
0.7	'PPDF (3)'	-27.0	'DEL13C'
5.0	'PPDF (4)'	1.3	'CO2IPR (1)'
0.0	'BIOFLG'	0.77	'CO2ITR (1)'
1800.0	'BIOK5'	1.0	'CO2ICE (1,1,1)'
0.4	'PLTMRF'	1.0	'CO2ICE (1,1,2)'
150.0	'FULCAN'	1.0	'CO2ICE (1,1,3)'
0.6	'FRTC (1)'	1.3	'CO2ICE (1,2,1)'
0.1	'FRTC (2)'	1.0	'CO2ICE (1,2,2)'
3.0	'FRTC (3)'	1.0	'CO2ICE (1,2,3)'
600.0	'BIOMAX'	1.0	'CO2IRS (1)'
12.0	'PRAMN (1,1)'		
100.0	'PRAMN (2,1)'	MPCAMCOE	milho
100.0	'PRAMN (3,1)'	260.0	'PRDX (1)'
40.0	'PRAMN (1,2)'	30.0	'PPDF (1)'
160.0	'PRAMN (2,2)'	45.0	'PPDF (2)'

APÊNDICE 5. Continuação.

1.0	'PPDF(3)'	-15.0	'DEL13C'
2.5	'PPDF(4)'	1.0	'CO2IPR(1)'
0.0	'BIOFLG'	0.77	'CO2ITR(1)'
1800.0	'BIOK5'	1.0	'CO2ICE(1,1,1)'
0.5	'PLTMRF'	1.0	'CO2ICE(1,1,2)'
150.0	'FULCAN'	1.0	'CO2ICE(1,1,3)'
0.5	'FRTC(1)'	1.0	'CO2ICE(1,2,1)'
0.1	'FRTC(2)'	1.0	'CO2ICE(1,2,2)'
3.0	'FRTC(3)'	1.0	'CO2ICE(1,2,3)'
700.0	'BIOMAX'	1.0	'CO2IRS(1)'
10.0	'PRAMN(1,1)'		
150.0	'PRAMN(2,1)'	PDCOEAV	aveia + vica
190.0	'PRAMN(3,1)'	180.0	'PRDX(1)'
62.5	'PRAMN(1,2)'	18.0	'PPDF(1)'
150.0	'PRAMN(2,2)'	35.0	'PPDF(2)'
150.0	'PRAMN(3,2)'	0.7	'PPDF(3)'
20.0	'PRAMX(1,1)'	5.0	'PPDF(4)'
230.0	'PRAMX(2,1)'	0.0	'BIOFLG'
230.0	'PRAMX(3,1)'	1800.0	'BIOK5'
125.0	'PRAMX(1,2)'	0.4	'PLTMRF'
230.0	'PRAMX(2,2)'	150.0	'FULCAN'
230.0	'PRAMX(3,2)'	0.6	'FRTC(1)'
45.0	'PRBMN(1,1)'	0.1	'FRTC(2)'
390.0	'PRBMN(2,1)'	3.0	'FRTC(3)'
340.0	'PRBMN(3,1)'	600.0	'BIOMAX'
0.0	'PRBMN(1,2)'	8.78	'PRAMN(1,1)'
0.0	'PRBMN(2,2)'	100.0	'PRAMN(2,1)'
0.0	'PRBMN(3,2)'	100.0	'PRAMN(3,1)'
60.0	'PRBMX(1,1)'	35.0	'PRAMN(1,2)'
420.0	'PRBMX(2,1)'	160.0	'PRAMN(2,2)'
420.0	'PRBMX(3,1)'	200.0	'PRAMN(3,2)'
0.0	'PRBMX(1,2)'	17.5	'PRAMX(1,1)'
0.0	'PRBMX(2,2)'	200.0	'PRAMX(2,1)'
0.0	'PRBMX(3,2)'	230.0	'PRAMX(3,1)'
0.12	'FLIGNI(1,1)'	70.0	'PRAMX(1,2)'
0.0	'FLIGNI(2,1)'	260.0	'PRAMX(2,2)'
0.06	'FLIGNI(1,2)'	270.0	'PRAMX(3,2)'
0.0	'FLIGNI(2,2)'	34.5	'PRBMN(1,1)'
0.4	'HIMAX'	390.0	'PRBMN(2,1)'
0.0	'HIWSF'	340.0	'PRBMN(3,1)'
2.0	'HIMON(1)'	0.0	'PRBMN(1,2)'
1.0	'HIMON(2)'	0.0	'PRBMN(2,2)'
0.75	'EFRGRN(1)'	0.0	'PRBMN(3,2)'
0.6	'EFRGRN(2)'	44.0	'PRBMX(1,1)'
0.6	'EFRGRN(3)'	420.0	'PRBMX(2,1)'
0.04	'VLOSSP'	420.0	'PRBMX(3,1)'
0.0	'FSDETH(1)'	0.0	'PRBMX(1,2)'
0.0	'FSDETH(2)'	0.0	'PRBMX(2,2)'
0.0	'FSDETH(3)'	0.0	'PRBMX(3,2)'
500.0	'FSDETH(4)'	0.15	'FLIGNI(1,1)'
0.1	'FALLRT'	0.0	'FLIGNI(2,1)'
0.05	'RDR'	0.06	'FLIGNI(1,2)'
2.0	'RTDTMP'	0.0	'FLIGNI(2,2)'
0.0	'CRPRTF(1)'	0.35	'HIMAX'
0.0	'CRPRTF(2)'	0.42	'HIWSF'
0.0	'CRPRTF(3)'	1.0	'HIMON(1)'
0.0	'SNFXMX(1)'	1.0	'HIMON(2)'

APÊNDICE 5. Continuação.

0.6		'EFRGRN (1) '	82.5	'PRAMX (1,2) '
0.6		'EFRGRN (2) '	230.0	'PRAMX (2,2) '
0.6		'EFRGRN (3) '	230.0	'PRAMX (3,2) '
0.04		'VLOSSP '	34.5	'PRBMN (1,1) '
0.0		'FSDETH (1) '	390.0	'PRBMN (2,1) '
0.0		'FSDETH (2) '	340.0	'PRBMN (3,1) '
0.0		'FSDETH (3) '	0.0	'PRBMN (1,2) '
200.0		'FSDETH (4) '	0.0	'PRBMN (2,2) '
0.12		'FALLRT '	0.0	'PRBMN (3,2) '
0.05		'RDR '	44.0	'PRBMX (1,1) '
2.0		'RTDTMP '	420.0	'PRBMX (2,1) '
0.0		'CRPRTF (1) '	420.0	'PRBMX (3,1) '
0.0		'CRPRTF (2) '	0.0	'PRBMX (1,2) '
0.0		'CRPRTF (3) '	0.0	'PRBMX (2,2) '
0.0		'SNFXMX (1) '	0.0	'PRBMX (3,2) '
-27.0		'DEL13C '	0.12	'FLIGNI (1,1) '
1.3		'CO2IPR (1) '	0.0	'FLIGNI (2,1) '
0.77		'CO2ITR (1) '	0.06	'FLIGNI (1,2) '
1.0		'CO2ICE (1,1,1) '	0.0	'FLIGNI (2,2) '
1.0		'CO2ICE (1,1,2) '	0.4	'HIMAX '
1.0		'CO2ICE (1,1,3) '	0.0	'HIWSF '
1.3		'CO2ICE (1,2,1) '	2.0	'HIMON (1) '
1.0		'CO2ICE (1,2,2) '	1.0	'HIMON (2) '
1.0		'CO2ICE (1,2,3) '	0.75	'EFRGRN (1) '
1.0		'CO2IRS (1) '	0.6	'EFRGRN (2) '
			0.6	'EFRGRN (3) '
			0.04	'VLOSSP '
MCPDCOE	milho + caupi			'FSDETH (1) '
250.0		'PRDX (1) '	0.0	'FSDETH (2) '
30.0		'PPDF (1) '	0.0	'FSDETH (3) '
45.0		'PPDF (2) '	0.0	'FSDETH (4) '
1.0		'PPDF (3) '	500.0	'FALLRT '
2.5		'PPDF (4) '	0.1	'RDR '
0.0		'BIOFLG '	0.05	'RTDTMP '
1800.0		'BIOK5 '	2.0	'CRPRTF (1) '
0.5		'PLTMRF '	0.0	'CRPRTF (2) '
150.0		'FULCAN '	0.0	'CRPRTF (3) '
0.5		'FRTC (1) '	0.0	'SNFXMX (1) '
0.1		'FRTC (2) '	0.0	'DEL13C '
3.0		'FRTC (3) '	-15.0	'CO2IPR (1) '
700.0		'BIOMAX '	1.0	'CO2ITR (1) '
8.77		'PRAMN (1,1) '	0.77	'CO2ICE (1,1,1) '
150.0		'PRAMN (2,1) '	1.0	'CO2ICE (1,1,2) '
190.0		'PRAMN (3,1) '	1.0	'CO2ICE (1,1,3) '
46.25		'PRAMN (1,2) '	1.0	'CO2ICE (1,2,1) '
150.0		'PRAMN (2,2) '	1.0	'CO2ICE (1,2,2) '
150.0		'PRAMN (3,2) '	1.0	'CO2ICE (1,2,3) '
10.0		'PRAMX (1,1) '	1.0	'CO2IRS (1) '
230.0		'PRAMX (2,1) '	1.0	
230.0		'PRAMX (3,1) '		

APÊNDICE 6. Quantidades mensais de carbono adicionadas (ad) e liberadas (lib) no período de outubro de 1995 à setembro de 1997 nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.

mês/ano	pcam ⁽¹⁾		pc avmc		sd am		sd avmc		campo nativo	
	ad	lib	ad	lib	ad	lib	ad	lib	ad	lib
out 1995	69,60	800,69	125,02	1182,95	59,23	472,86	121,75	738,45	464,88	635,73
nov 1995	6,56	521,85	14,24	738,58	13,16	422,44	23,98	657,01	490,21	697,22
dez 1995	12,66	367,14	20,68	538,45	18,32	362,47	30,35	565,69	514,83	762,91
jan 1996	18,86	311,65	29,48	468,71	26,38	327,16	43,43	496,47	631,90	797,01
fev 1996	1913,13	262,90	2671,64	380,84	2240,09	270,28	3279,05	385,04	897,75	707,42
mar 1996	936,81	685,83	1278,41	900,86	937,14	718,01	1315,99	1023,17	1013,04	647,35
abr 1996	0,00	734,22	0,00	991,86	0,00	717,40	0,00	965,99	985,36	737,93
mai 1996	2,18	420,30	3,71	572,50	1,55	417,13	3,62	559,72	802,01	670,27
jun 1996	4,17	252,57	6,95	341,18	3,06	260,64	6,85	349,37	556,14	570,11
jul 1996	5,44	199,78	9,19	265,72	4,23	208,77	9,08	278,60	518,34	497,31
ago 1996	5,87	202,28	9,99	265,03	4,64	210,09	9,87	277,65	476,46	547,00
set 1996	1490,10	284,98	2690,35	371,83	976,89	205,11	2011,26	276,95	496,35	570,31
out 1996	66,51	782,96	125,02	1180,92	58,84	466,52	120,94	737,56	464,88	635,73
nov 1996	5,72	513,37	14,24	736,63	12,92	416,44	23,88	656,90	490,21	697,22
dez 1996	11,64	357,31	20,68	536,45	17,87	356,66	30,25	566,54	514,83	762,91
jan 1997	17,51	300,76	29,48	466,59	25,46	320,00	43,30	497,97	631,90	797,01
fev 1997	1818,60	252,28	2671,64	378,93	2184,83	265,07	3273,13	386,61	897,75	707,42
mar 1997	903,25	661,66	1278,41	899,30	916,14	703,69	1316,00	1022,77	1013,04	647,35
abr 1997	0,00	707,23	0,00	989,98	0,00	703,74	0,00	966,57	985,36	737,93
mai 1997	2,03	404,44	3,71	570,96	1,54	408,73	3,50	560,97	802,01	670,27
jun 1997	3,99	242,54	6,95	340,11	3,05	255,20	6,71	350,31	556,14	570,11
jul 1997	5,26	191,65	9,19	264,78	4,20	204,46	8,93	279,43	518,34	497,31
ago 1997	5,68	194,01	9,99	263,98	4,61	205,86	9,72	278,56	476,46	547,00
set 1997	1464,42	273,41	2690,35	370,07	972,59	201,00	1996,94	277,84	496,35	570,32

⁽¹⁾ pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

APÊNDICE 6. Quantidades mensais de carbono adicionadas (ad) e liberadas (lib) no período de outubro de 2035 à setembro de 2037 nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.

mês/ano	pcam ⁽¹⁾		pc avmc		sd am		sd avmc		campo nativo	
	ad	lib	ad	lib	ad	lib	ad	lib	ad	lib
out 2035	22,01	546,14	99,45	1131,75	44,28	348,62	120,82	754,87	464,88	635,74
nov 2035	1,96	290,60	9,43	696,52	8,98	302,25	23,86	677,34	490,21	697,23
dez 2035	3,65	197,08	15,55	474,96	12,21	248,41	30,23	590,33	514,83	762,91
jan 2036	0,00	151,82	22,79	393,73	15,84	212,11	43,28	524,20	631,90	797,01
fev 2036	713,63	120,72	2297,08	323,97	1517,85	172,96	3272,31	410,07	897,75	707,42
mar 2036	370,87	321,93	1153,64	782,12	643,95	538,04	1316,00	1040,35	1013,04	647,36
abr 2036	0,00	297,57	0,00	874,29	0,00	495,62	0,00	986,19	985,36	737,93
mai 2036	1,42	157,37	3,14	500,11	1,26	276,81	3,63	576,99	802,01	670,27
jun 2036	3,10	92,01	6,29	294,99	2,55	169,45	6,87	362,19	556,14	570,11
jul 2036	4,26	72,25	8,48	227,97	3,49	135,01	9,10	290,49	518,34	497,32
ago 2036	4,63	73,76	9,27	226,06	3,80	136,43	9,89	291,44	476,46	547,01
set 2036	1204,14	105,02	2576,48	314,61	752,48	133,50	2013,42	292,14	496,35	570,32
out 2036	21,79	542,93	98,45	1130,85	44,05	346,67	121,10	756,02	464,88	635,73
nov 2036	1,95	288,43	9,36	695,07	8,92	300,36	23,89	678,35	490,21	697,23
dez 2036	3,62	195,51	15,47	473,55	12,13	246,66	30,27	591,14	514,83	762,91
jan 2037	0,00	150,66	22,68	392,23	15,72	210,49	43,33	524,88	631,90	797,01
fev 2037	708,43	119,76	2290,91	322,90	1508,16	171,59	3274,30	410,58	897,75	707,42
mar 2037	368,03	319,76	1150,67	780,75	639,83	535,44	1316,00	1041,24	1013,04	647,36
abr 2037	0,00	295,19	0,00	872,33	0,00	492,34	0,00	986,73	985,36	737,93
mai 2037	1,41	155,96	3,12	498,93	1,25	274,73	3,66	577,25	802,01	670,27
jun 2037	3,09	91,17	6,27	294,19	2,55	168,11	6,91	362,39	556,14	570,11
jul 2037	4,24	71,59	8,45	227,31	3,47	133,92	9,14	290,69	518,34	497,32
ago 2037	4,61	73,10	9,24	225,37	3,79	135,33	9,93	291,68	476,46	547,01
set 2037	1197,93	104,08	2571,88	313,62	748,97	132,43	2017,08	292,44	496,35	570,32

⁽¹⁾ pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

APÊNDICE 6. Quantidades mensais de carbono adicionadas (ad) e liberadas (lib) no período de outubro de 2135 à setembro de 2137 nos sistemas solo simulados pelo modelo Century 4.0.

mês/ano	pcam ⁽¹⁾		pc avmc		sd am		sd avmc		campo nativo	
	ad	lib	ad	lib	ad	lib	ad	lib	ad	lib
out 2135	16,72	465,79	55,12	1076,05	37,78	287,29	121,75	761,75	464,88	635,73
nov 2135	1,65	238,94	5,61	616,52	7,37	241,40	23,98	684,21	490,21	697,23
dez 2135	3,05	160,93	11,06	396,29	9,94	191,67	30,35	597,06	514,83	762,91
jan 2136	0,00	125,24	16,50	316,34	12,57	159,73	43,43	530,85	631,90	797,00
fev 2136	583,35	98,91	1895,75	255,65	1213,66	128,48	3279,05	415,69	897,75	707,42
mar 2136	300,28	269,21	971,39	682,16	507,31	448,71	1315,99	1047,63	1013,04	647,36
abr 2136	0,00	239,89	0,00	742,91	0,00	388,16	0,00	991,85	985,36	737,93
mai 2136	1,30	124,19	2,14	418,35	1,12	209,06	3,71	580,84	802,01	670,27
jun 2136	2,80	72,45	5,14	241,60	2,30	126,01	6,95	364,94	556,14	570,12
jul 2136	3,82	57,03	7,23	184,17	3,13	99,77	9,19	293,02	518,34	497,32
ago 2136	4,14	58,52	8,00	181,03	3,40	100,70	9,99	294,35	476,46	547,01
set 2136	1048,84	83,51	2374,79	250,26	653,77	98,49	2022,26	295,39	496,35	570,32
out 2136	16,70	465,52	55,04	1075,84	37,77	287,18	121,75	761,75	464,88	635,73
nov 2136	1,65	238,77	5,60	616,29	7,37	241,29	23,98	684,21	490,21	697,23
dez 2136	3,05	160,82	11,05	396,12	9,94	191,57	30,35	597,06	514,83	762,91
jan 2137	0,00	125,16	16,48	316,16	12,56	159,64	43,43	530,85	631,90	797,00
fev 2137	582,99	98,85	1894,68	255,47	1213,07	128,41	3279,05	415,69	897,75	707,42
mar 2137	300,08	269,06	970,91	681,87	507,03	448,53	1315,99	1047,63	1013,04	647,36
abr 2137	0,00	239,72	0,00	742,53	0,00	387,95	0,00	991,86	985,36	737,93
mai 2137	1,30	124,10	2,14	418,12	1,12	208,94	3,71	580,84	802,01	670,27
jun 2137	2,80	72,40	5,13	241,46	2,30	125,93	6,95	364,95	556,14	570,12
jul 2137	3,82	56,99	7,23	184,05	3,13	99,70	9,19	293,02	518,34	497,32
ago 2137	4,14	58,47	8,00	180,91	3,40	100,64	9,99	294,35	476,46	547,01
set 2137	1048,23	83,45	2374,29	250,09	653,58	98,43	2022,26	295,39	496,35	570,32

⁽¹⁾ pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vicia; c = caupi.

APÊNDICE 7. Peso de agregados após peneiragens via úmida e via seca e após separação das partículas simples e peso das partículas simples para cada repetição dos sistemas solo sobre PVd e PVAd na coleta do ano 1999.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
CN PVd	I	>4.76	20,32	16,2	16,20	0,00
		4.76-2.00	8,2	9,85	9,81	0,03
		2.00-0.25	12,94	13,62	5,92	7,69
		0.25-0.053	4,55	6,14	3,02	3,12
		< 0.053	2,39	2,39	1,85	0,54
CN PVd	II	>4.76	20,58	17,79	17,69	0,09
		4.76-2.00	9,23	10,46	9,51	0,94
		2.00-0.25	13,02	13,53	7,78	5,73
		0.25-0.053	3,53	4,52	2,22	2,30
		< 0.053	2,52	2,52	1,91	0,61
CN PVd	III	>4.76	22,84	19,91	19,91	0,00
		4.76-2.00	8,01	9,12	8,42	0,70
		2.00-0.25	11,73	12,12	5,54	6,56
		0.25-0.053	1,74	2,86	1,54	1,32
		< 0.053	4,32	4,32	2,21	2,11
pc am	I	>4.76	10,82	7,85	7,85	0,00
		4.76-2.00	6,25	6,41	5,40	0,99
		2.00-0.25	22	21,15	10,06	11,08
		0.25-0.053	5,54	8,8	4,80	4,00
		< 0.053	4,19	4,19	3,50	0,69
pc am	II	>4.76	9,6	6,68	6,53	0,15
		4.76-2.00	8,4	8,18	7,04	1,11
		2.00-0.25	19,46	19,36	8,63	10,71
		0.25-0.053	6,07	8,84	5,03	3,81
		< 0.053	4,91	4,91	4,10	0,81
pc am	III	>4.76	3,3	1,96	1,84	0,11
		4.76-2.00	perdida	perdida	perdida	perdida
		2.00-0.25	24,55	21	8,95	12,03
		0.25-0.053	3,46	7,27	3,15	4,12
		< 0.053	11,35	11,35	6,57	4,78
pc avmc	I	>4.76	14,03	11,66	11,66	0,00
		4.76-2.00	5,8	5,81	4,52	1,27
		2.00-0.25	17,15	15,97	6,19	9,77
		0.25-0.053	7,24	10,23	5,44	4,79
		< 0.053	4,39	4,39	3,86	0,53
pc avmc	II	>4.76	11,71	9,94	9,94	0,00
		4.76-2.00	3,69	3,75	2,75	1,00
		2.00-0.25	19,57	18,05	7,17	10,82
		0.25-0.053	6,83	9,58	4,71	4,87
		< 0.053	6,86	6,86	5,62	1,24

APÊNDICE 7. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
pc avmc	III	>4.76	7,17	5,55	5,55	0,00
		4.76-2.00	6,6	6,13	4,76	1,35
		2.00-0.25	22,19	20,26	7,45	8,45
		0.25-0.053	5,4	8,99	4,34	4,65
		< 0.053	7,02	7,02	5,33	1,69
sd am	I	>4.76	16,07	13,55	13,55	0,00
		4.76-2.00	4,36	5,17	4,82	0,34
		2.00-0.25	19,05	18,1	8,25	9,79
		0.25-0.053	6,37	8,84	4,28	4,56
		< 0.053	3,29	3,29	2,73	0,56
sd am	II	>4.76	19,34	17,36	17,36	0,00
		4.76-2.00	5,1	5,75	4,61	1,13
		2.00-0.25	12,41	11,98	6,11	5,86
		0.25-0.053	4,59	6,06	2,22	3,84
		< 0.053	7,49	7,49	4,87	2,62
sd am	III	>4.76	17,68	14,19	14,03	0,16
		4.76-2.00	6,2	7,28	5,65	1,62
		2.00-0.25	14,09	14,64	7,11	7,49
		0.25-0.053	4,38	6	3,64	2,36
		< 0.053	6,44	6,44	4,01	2,43
sd avmc	I	>4.76	20,44	17,55	17,55	0,00
		4.76-2.00	5,21	5,95	5,62	0,33
		2.00-0.25	14,97	14,31	5,68	8,60
		0.25-0.053	5,64	7,98	4,97	3,01
		< 0.053	3,14	3,14	2,60	0,54
sd avmc	II	>4.76	18,67	16,59	16,59	0,00
		4.76-2.00	5,11	5,86	5,53	0,33
		2.00-0.25	15,51	14,45	5,37	9,07
		0.25-0.053	4,71	6,69	3,55	3,14
		< 0.053	4,86	4,86	3,84	1,02
sd avmc	III	>4.76	16,5	14,57	14,36	0,20
		4.76-2.00	6,83	7,13	5,35	1,77
		2.00-0.25	15,6	14,37	6,62	7,73
		0.25-0.053	4,2	6,63	4,69	1,94
		< 0.053	6,22	6,22	4,08	2,14
pangola	I	>4.76	24,56	19,98	19,98	0,00
		4.76-2.00	4,63	6,82	6,25	0,57
		2.00-0.25	12,88	13,57	5,67	7,88
		0.25-0.053	3,95	5,51	3,01	2,50
		< 0.053	2,13	2,13	1,64	0,49
pangola	II	>4.76	22,47	19,96	19,96	0,00
		4.76-2.00	5,33	6,77	6,41	0,36
		2.00-0.25	14,43	14,48	6,99	7,48
		0.25-0.053	3,58	4,48	2,50	1,98
		< 0.053	3,31	3,31	2,50	0,81

APÊNDICE 7. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
pangola	III	>4.76	20,61	17,32	17,32	0,00
		4.76-2.00	7,02	8,54	7,56	0,99
		2.00-0.25	14,94	14,9	6,11	8,76
		0.25-0.053	2,84	4,51	2,31	2,20
		< 0.053	3,77	3,77	2,82	0,95
guandu/m	I	>4.76	14,56	10,2	10,20	0,00
		4.76-2.00	7,37	9,19	8,40	0,79
		2.00-0.25	19,12	19,01	9,49	9,51
		0.25-0.053	5,35	7,78	4,55	3,23
		< 0.053	2,59	2,59	2,05	0,54
guandu/m	II	>4.76	12,73	9,83	9,83	0,00
		4.76-2.00	7,89	9,22	7,68	1,53
		2.00-0.25	18,18	17,96	7,73	10,21
		0.25-0.053	3,92	5,64	3,40	2,24
		< 0.053	5,61	5,61	4,44	1,17
guandu/m	III	>4.76	14,05	11,49	11,49	0,00
		4.76-2.00	7,37	8	7,52	0,48
		2.00-0.25	19,1	18,17	7,03	11,11
		0.25-0.053	3,78	6,46	3,88	2,58
		< 0.053	5,05	5,05	3,74	1,31
lablab/m	I	>4.76	13,94	11,18	11,08	0,09
		4.76-2.00	6,48	7,07	6,41	0,65
		2.00-0.25	19,11	18,59	8,94	9,62
		0.25-0.053	5,61	7,79	4,47	3,32
		< 0.053	3,05	3,05	2,53	0,52
lablab/m	II	>4.76	15,43	13,37	13,37	0,00
		4.76-2.00	4,94	5,26	4,79	0,45
		2.00-0.25	18,45	17,76	7,64	10,11
		0.25-0.053	4,4	6,47	2,85	3,62
		< 0.053	5,79	5,79	4,63	1,16
lablab/m	III	>4.76	13,57	11,35	11,35	0,00
		4.76-2.00	5,64	5,46	4,54	0,92
		2.00-0.25	18,25	18,25	9,06	9,16
		0.25-0.053	3,84	5,73	3,12	2,61
		< 0.053	6,58	6,58	4,76	1,82
descoberto	I	>4.76	8,42	5,06	5,06	0,00
		4.76-2.00	5,21	4,9	3,94	0,95
		2.00-0.25	23,54	22,35	7,71	14,64
		0.25-0.053	6,29	10,06	5,39	4,67
		< 0.053	5,76	5,76	4,65	1,11
descoberto	II	>4.76	5,2	3,88	3,88	0,00
		4.76-2.00	3,29	2,56	2,31	0,25
		2.00-0.25	21,9	19,18	5,81	13,37
		0.25-0.053	6,04	9,92	7,02	2,90
		< 0.053	12,93	12,93	7,90	5,03

APÊNDICE 7. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
descoberto	III	>4.76	6,48	4,44	4,28	0,14
		4.76-2.00	4,94	4,09	3,37	0,71
		2.00-0.25	25,29	22,53	8,91	13,59
		0.25-0.053	8,93	13,24	7,46	5,78
		< 0.053	3,71	3,71	3,36	0,35
lavoura	I	>4.76	1,54	0,59	0,59	0,00
		4.76-2.00	4,84	3,28	2,76	0,51
		2.00-0.25	29,14	25,32	4,06	21,26
		0.25-0.053	7,55	12,18	7,31	4,87
		< 0.053	5,48	5,48	4,48	1,00
lavoura	II	>4.76	8,12	6,08	6,08	0,00
		4.76-2.00	4,42	4,35	3,33	1,02
		2.00-0.25	23,05	21,04	2,81	18,22
		0.25-0.053	7,13	10,58	6,27	4,31
		< 0.053	6,27	6,27	6,19	0,08
lavoura	III	>4.76	3,8	2,48	2,48	0,00
		4.76-2.00	5,23	4,12	3,12	1,02
		2.00-0.25	25,64	23,8	4,43	19,34
		0.25-0.053	5,06	8,67	4,61	4,06
		< 0.053	8,99	8,99	6,55	2,44
CN PVAd	I	>4.76	20,59	13,11	13,11	0,00
		4.76-2.00	7,36	10,66	10,22	0,43
		2.00-0.25	13,2	15,06	3,77	11,28
		0.25-0.053	4,86	6,83	4,29	2,54
		< 0.053	2,75	2,75	1,82	0,93
CN PVAd	II	>4.76	11,77	7,88	7,88	0,00
		4.76-2.00	7,46	8,65	7,27	1,36
		2.00-0.25	18,92	19,17	3,41	15,72
		0.25-0.053	6,22	8,55	4,50	4,05
		< 0.053	4,65	4,65	3,39	1,26
CN PVAd	III	>4.76	6,57	4,35	4,35	0,00
		4.76-2.00	10,52	9,67	7,54	2,11
		2.00-0.25	21,73	21,52	5,19	16,32
		0.25-0.053	2,17	5,07	2,66	2,41
		< 0.053	7,7	7,7	3,89	3,81
sem adição	I	>4.76	0,71	0,64	0,64	0,00
		4.76-2.00	4,47	1,9	1,57	0,32
		2.00-0.25	31,77	27,35	14,72	12,61
		0.25-0.053	7,25	13,59	6,96	6,63
		< 0.053	5,28	5,28	4,60	0,68
sem adição	II	>4.76	0,28	0,17	0,17	0,00
		4.76-2.00	3,17	1,34	1,13	0,20
		2.00-0.25	31,24	27,2	13,01	14,14
		0.25-0.053	6,88	12,29	5,80	6,49
		< 0.053	7,87	7,87	6,40	1,47

APÊNDICE 7. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
sem adição	III	>4.76	0,16	0	0,00	0,00
		4.76-2.00	4,47	1,34	0,90	0,45
		2.00-0.25	29,78	27,85	12,62	15,18
		0.25-0.053	4,89	9,64	4,59	5,05
		< 0.053	9,99	9,99	6,41	3,58

APÊNDICE 8. Peso de agregados após peneiragens via úmida e via seca e após separação das partículas simples e peso das partículas simples para cada repetição dos sistemas solo sobre PVd, PVAd e LVdf na coleta do ano 2000.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
CN PVd	I	>4.76	21,84	17,51	17,51	0,00
		4.76-2.00	3,82	5,74	5,25	0,50
		2.00-0.25	14,60	14,33	4,04	10,26
		0.25-0.053	5,44	7,75	5,01	2,74
		<0.053	3,38	3,38	2,78	0,60
CN PVd	II	>4.76	23,60	20,68	20,68	0,00
		4.76-2.00	4,14	5,30	4,92	0,38
		2.00-0.25	13,43	13,31	6,34	6,96
		0.25-0.053	3,49	5,13	3,12	2,01
		<0.053	4,22	4,22	3,66	0,56
CN PVd	III	>4.76	22,59	18,75	18,34	0,41
		4.76-2.00	5,84	7,69	6,79	0,90
		2.00-0.25	13,00	13,17	6,57	6,57
		0.25-0.053	2,91	4,53	2,50	2,03
		<0.053	4,51	4,51	3,23	1,28
pc am	I	>4.76	9,06	5,74	5,74	0,00
		4.76-2.00	6,37	5,82	4,48	1,26
		2.00-0.25	22,98	21,97	10,64	11,28
		0.25-0.053	7,67	11,47	6,73	4,74
		<0.053	3,03	3,03	2,71	0,32
pc am	II	>4.76	6,75	4,76	4,76	0,00
		4.76-2.00	4,91	5,16	4,12	1,02
		2.00-0.25	19,02	18,45	7,50	10,91
		0.25-0.053	5,64	7,65	3,62	4,03
		<0.053	12,60	12,60	8,31	4,29
pc am	III	>4.76	1,83	0,99	0,99	0,00
		4.76-2.00	4,81	2,99	1,48	1,48
		2.00-0.25	28,18	25,36	12,86	12,46
		0.25-0.053	4,14	8,89	3,74	5,15
		<0.053	10,00	10,00	6,06	3,94
pc avmc	I	>4.76	9,46	7,26	7,26	0,00
		4.76-2.00	5,41	5,58	4,64	0,93
		2.00-0.25	21,71	20,14	9,84	10,27
		0.25-0.053	4,64	8,03	4,55	3,48
		<0.053	7,83	7,83	4,85	2,98
pc avmc	II	>4.76	10,83	7,57	7,57	0,00
		4.76-2.00	5,59	5,72	4,35	1,39
		2.00-0.25	19,49	18,15	6,86	11,28
		0.25-0.053	7,46	11,31	7,20	4,11
		<0.053	5,77	5,77	5,02	0,75

APÊNDICE 8. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
pc avmc	III	>4.76	3,25	2,10	2,10	0,00
		4.76-2.00	5,74	4,27	3,23	1,02
		2.00-0.25	24,43	22,07	10,06	12,02
		0.25-0.053	8,45	12,61	6,94	5,67
		< 0.053	7,37	7,37	6,14	1,23
sd am	I	>4.76	16,77	13,79	13,79	0,00
		4.76-2.00	4,30	5,20	4,59	0,59
		2.00-0.25	15,96	14,78	4,50	10,25
		0.25-0.053	4,66	7,22	3,97	3,25
		< 0.053	7,74	7,74	5,53	2,21
sd am	II	>4.76	17,28	14,38	14,38	0,00
		4.76-2.00	4,48	4,68	4,06	0,61
		2.00-0.25	16,60	15,01	6,70	8,27
		0.25-0.053	7,45	10,42	5,30	5,12
		< 0.053	3,44	3,44	3,06	0,38
sd am	III	>4.76	16,28	13,45	13,16	0,29
		4.76-2.00	4,92	5,02	4,05	0,97
		2.00-0.25	17,24	16,16	5,20	10,87
		0.25-0.053	7,29	10,37	5,30	5,07
		< 0.053	3,67	3,67	3,26	0,41
sd avmc	I	>4.76	11,51	10,17	10,17	0,00
		4.76-2.00	6,23	6,28	5,31	0,97
		2.00-0.25	19,20	18,53	7,36	11,16
		0.25-0.053	3,31	4,87	2,44	2,44
		< 0.053	9,07	9,07	5,84	3,23
sd avmc	II	>4.76	19,96	15,19	15,19	0,00
		4.76-2.00	5,90	7,90	7,40	0,49
		2.00-0.25	14,02	13,86	7,09	6,75
		0.25-0.053	5,16	7,66	4,24	3,42
		< 0.053	3,98	3,98	2,61	1,37
sd avmc	III	>4.76	16,09	13,01	13,01	0,00
		4.76-2.00	5,00	5,78	4,19	1,61
		2.00-0.25	17,29	15,98	8,08	7,88
		0.25-0.053	6,73	9,78	4,89	4,89
		< 0.053	3,96	3,96	3,40	0,56
pangola	I	>4.76	24,09	20,31	20,31	0,00
		4.76-2.00	4,90	6,64	5,90	0,73
		2.00-0.25	14,11	13,36	5,48	7,82
		0.25-0.053	3,26	5,31	2,95	2,36
		< 0.053	3,00	3,00	2,80	0,20
pangola	II	>4.76	19,05	14,95	14,95	0,00
		4.76-2.00	6,22	7,05	6,60	0,44
		2.00-0.25	15,25	16,12	6,71	9,38
		0.25-0.053	5,13	6,75	3,59	3,16
		< 0.053	3,64	3,64	2,81	0,83

APÊNDICE 8. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
pangola	III	>4.76	18,73	15,45	15,28	0,15
		4.76-2.00	6,18	7,66	6,94	0,71
		2.00-0.25	16,65	15,80	7,22	8,56
		0.25-0.053	2,96	4,89	2,13	2,76
		< 0.053	4,86	4,86	3,31	1,55
guandu/m	I	>4.76	17,89	14,96	14,68	0,27
		4.76-2.00	5,59	7,30	6,86	0,45
		2.00-0.25	16,58	15,81	6,41	9,37
		0.25-0.053	2,58	4,21	2,12	2,09
		< 0.053	6,55	6,55	4,73	1,82
guandu/m	II	>4.76	17,04	12,75	12,75	0,00
		4.76-2.00	6,36	8,44	7,38	1,05
		2.00-0.25	16,78	16,63	7,34	9,27
		0.25-0.053	5,88	7,91	4,59	3,32
		< 0.053	2,88	2,88	2,55	0,33
guandu/m	III	>4.76	14,28	12,42	12,42	0,00
		4.76-2.00	5,39	4,81	4,47	0,35
		2.00-0.25	19,34	18,37	7,95	10,39
		0.25-0.053	6,39	9,36	5,38	3,98
		< 0.053	9,72	9,72	8,59	1,13
lablab/m	I	>4.76	14,47	10,01	10,01	0,00
		4.76-2.00	4,83	6,90	6,31	0,58
		2.00-0.25	19,30	18,82	7,98	12,87
		0.25-0.053	2,38	4,95	2,38	2,57
		< 0.053	8,13	8,13	5,46	2,67
lablab/m	II	>4.76	14,03	11,14	11,14	0,00
		4.76-2.00	4,25	4,17	3,82	0,33
		2.00-0.25	20,49	19,39	6,32	13,05
		0.25-0.053	7,18	10,82	5,88	4,94
		< 0.053	3,25	3,25	2,73	0,52
lablab/m	III	>4.76	17,10	13,13	13,13	0,00
		4.76-2.00	5,56	7,01	6,05	0,96
		2.00-0.25	17,63	17,38	8,02	9,36
		0.25-0.053	5,49	7,99	4,26	3,73
		< 0.053	3,44	3,44	2,97	0,47
descoberto	I	>4.76	10,86	6,64	6,64	0,00
		4.76-2.00	5,30	5,74	4,48	1,25
		2.00-0.25	21,92	21,27	8,63	12,62
		0.25-0.053	7,47	10,83	6,42	4,41
		< 0.053	3,74	3,74	3,30	0,44
descoberto	II	>4.76	7,54	6,03	6,03	0,00
		4.76-2.00	4,42	4,05	3,34	0,70
		2.00-0.25	23,55	22,38	6,48	15,86
		0.25-0.053	3,15	5,86	2,68	3,18
		< 0.053	10,67	10,67	6,76	3,91

APÊNDICE 8. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
descoberto	III	>4.76	4,61	2,69	2,69	0,00
		4.76-2.00	4,74	3,15	2,55	0,58
		2.00-0.25	27,15	24,97	10,12	14,81
		0.25-0.053	7,79	12,31	6,16	6,16
		< 0.053	5,22	5,22	4,37	0,85
lavoura	I	>4.76	6,84	5,24	5,24	0,00
		4.76-2.00	4,86	3,58	3,35	0,22
		2.00-0.25	23,04	20,42	8,50	11,92
		0.25-0.053	7,02	11,19	5,38	5,81
		< 0.053	7,55	7,55	6,17	1,38
lavoura	II	>4.76	0,00	0,00	0,00	0,00
		4.76-2.00	2,04	1,12	0,65	0,47
		2.00-0.25	25,13	22,31	8,42	13,89
		0.25-0.053	5,71	8,67	3,90	4,77
		< 0.053	16,45	16,45	11,25	5,20
lavoura	III	>4.76	3,68	2,50	2,50	0,00
		4.76-2.00	4,88	2,62	2,09	0,54
		2.00-0.25	26,68	23,66	7,95	15,71
		0.25-0.053	9,55	15,36	8,80	6,56
		< 0.053	4,61	4,61	4,08	0,53
CN PVAd	I	>4.76	16,24	11,16	10,15	0,99
		4.76-2.00	7,43	8,09	4,26	3,81
		2.00-0.25	14,89	16,06	4,27	11,78
		0.25-0.053	7,80	10,31	4,83	5,48
		< 0.053	3,30	3,30	2,59	0,71
CN PVAd	II	>4.76	14,72	11,05	11,05	0,00
		4.76-2.00	6,70	8,00	6,13	1,85
		2.00-0.25	17,15	17,38	6,59	10,80
		0.25-0.053	4,55	6,13	2,84	3,29
		< 0.053	6,39	6,39	3,99	2,40
CN PVAd	III	>4.76	14,47	11,10	11,10	0,00
		4.76-2.00	7,33	7,00	5,86	1,13
		2.00-0.25	18,53	18,47	7,98	10,47
		0.25-0.053	5,82	8,65	4,58	4,07
		< 0.053	3,22	3,22	2,44	0,78
sem adição	I	>4.76	0,57	0,38	0,38	0,00
		4.76-2.00	2,54	1,01	0,69	0,32
		2.00-0.25	31,19	27,94	11,71	15,21
		0.25-0.053	9,34	14,39	9,06	5,33
		< 0.053	5,72	5,72	0,00	0,00
sem adição	II	>4.76	1,28	0,87	0,87	0,00
		4.76-2.00	2,57	1,22	0,87	0,35
		2.00-0.25	27,72	25,95	14,93	10,98
		0.25-0.053	4,06	7,20	4,60	2,60
		< 0.053	13,68	13,68	8,46	5,22

APÊNDICE 8. Continuação.

Sistemas Solo (repetições)		classes de diâmetro (mm)	agregados peneiragem via úmida (g)	agregados peneiragem via seca (g)	agregados após separação partículas simples (g)	partículas simples (g)
sem adição	III	>4.76	0,00	0,00	0,00	0,00
		4.76-2.00	2,03	0,53	0,22	0,31
		2.00-0.25	32,49	27,81	10,07	17,72
		0.25-0.053	8,88	14,33	7,48	6,85
		< 0.053	5,78	5,78	5,14	0,64
CN LVdf	I	>4.76	23,87	21,13	20,74	0,42
		4.76-2.00	8,31	10,46	10,42	0,05
		2.00-0.25	9,26	9,81	8,54	1,25
		0.25-0.053	1,83	2,14	1,73	0,41
		< 0.053	4,24	4,24	3,08	1,16
CN LVdf	II	>4.76	23,36	22,03	22,03	0,00
		4.76-2.00	7,11	8,18	8,08	0,09
		2.00-0.25	10,66	10,81	10,05	0,75
		0.25-0.053	0,98	1,53	1,21	0,32
		< 0.053	3,10	3,10	2,55	0,55
CN LVdf	III	>4.76	25,24	22,47	22,47	0,00
		4.76-2.00	8,05	10,20	10,18	0,03
		2.00-0.25	8,80	9,18	8,57	0,61
		0.25-0.053	1,56	2,05	1,60	0,45
		< 0.053	1,80	1,80	1,27	0,53

APÊNDICE 9. Peso, em gramas, de agregados nas diferentes classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVd. Médias de 6 repetições das coletas dos anos de 1999 e 2000.

Sistemas Solo	classes de diâmetro dos agregados (mm)				
	> 4.76	4.76-2.00	2.00-0.25	0.25-0.053	< 0.053
	g				
CN PVd ⁽¹⁾	18,39 a A ⁽²⁾	7,45 a B	6,03 b B	2,90 b C	2,61 b C
pc am	4,61 cd B	4,79 abcde B	9,77 a A	4,51 ab B	5,21 ab B
pc avmc	7,35 c AB	4,04 cde C	7,93 ab A	5,53 ab ABC	5,14 ab BC
sd am	14,38 b A	4,63 bcde B	6,31 b B	4,12 ab B	3,91 ab B
sd avmc	14,50 b A	5,57 abcd BC	6,70 b B	4,13 ab BC	3,73 ab C
pangola	17,97 a A	6,61 abc B	6,36 b B	2,75 b C	2,65 b C
guandu/m	11,90 b A	7,07 ab B	7,66 ab B	3,99 ab C	4,35 ab C
lablab/m	11,68 b A	5,32 abcde C	7,99 ab B	3,83 ab C	3,85 ab C
descoberto	4,76 cd B	3,33 de B	7,94 ab A	5,86 a AB	5,06 ab B
lavoura	2,82 d B	2,55 e B	6,03 b A	6,04 a A	6,45 a A

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

⁽²⁾ Letras maiúsculas comparam classes dentro dos sistemas, e letras minúsculas comparam sistemas dentro das classes pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

APÊNDICE 10. Peso, em gramas, de agregados nas diferentes classes de diâmetro dos sistemas solo sobre PVAd. Médias de 6 repetições das coletas dos anos de 1999 e 2000.

Sistemas Solo	classes de diâmetro dos agregados (mm)				
	> 4.76	4.76-2.00	2.00-0.25	0.25-0.053	< 0.053
	g				
CN PVAd ⁽¹⁾	9,60 a A ⁽²⁾	6,88 a B	5,20 b BC	3,95 b C	3,02 b C
sem adição	0,34 b C	0,90 b C	12,84 a A	6,42 a B	6,30 a B

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico.

⁽²⁾ Letras maiúsculas comparam classes dentro dos sistemas, e letras minúsculas comparam sistemas dentro das classes pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

APÊNDICE 11. Peso, em gramas, de agregados nas classes de diâmetro dos sistemas campo nativo nos diferentes tipos de solo. Solos PVd e PVAd são médias de 6 repetições das coletas dos anos de 1999 e 2000, solo LVdf são médias de 3 repetições da coleta do ano 2000.

Sistemas Solo	classes de diâmetro dos agregados (mm)				
	> 4.76	4.76-2.00	2.00-0.25	0.25-0.053	< 0.053
	g				
CN PVd ⁽¹⁾	18,39 b A ⁽²⁾	7,45 b B	6,03 b B	2,90 ab C	2,61 a C
CN PVAd	9,60 c A	6,88 b B	5,20 b BC	3,95 a C	3,02 a C
CN LVdf	21,75 a A	9,56 a B	9,05 a B	1,51 b C	2,30 a C

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho Distroférico típico.

⁽²⁾ Letras maiúsculas comparam classes dentro dos sistemas, e letras minúsculas comparam sistemas dentro das classes pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

APÊNDICE 12. Teor de carbono total no solo, em percentagem, em cada repetição nos sistemas solo nas coletas dos anos de 1999 e 2000.

Sistemas Solo	repetições	Carbono total (%)	
		1999	2000
CN PVd ⁽¹⁾	I	1,72	1,87
	II	1,83	1,89
	III	1,79	1,63
pc am	I	0,95	1,06
	II	0,95	1,04
	III	0,87	0,94
pc avmc	I	1,38	1,17
	II	1,23	1,21
	III	1,24	1,10
sd am	I	1,22	1,24
	II	1,23	1,34
	III	1,22	1,06
sd avmc	I	1,71	1,57
	II	1,85	1,62
	III	1,37	1,41
pangola	I	1,42	1,23
	II	1,40	1,09
	III	1,52	1,37
guandu/m	I	1,68	1,62
	II	1,62	1,80
	III	1,63	1,53
lablab/m	I	1,54	1,53
	II	1,75	1,52
	III	1,72	1,38
descoberto	I	1,06	1,25
	II	1,22	1,13
	III	1,21	1,09
lavoura	I	0,89	1,28
	II	1,04	0,96
	III	0,91	1,10
CN PVAd	I	1,73	1,14
	II	1,54	1,66
	III	1,57	1,56
sem adição	I	0,78	0,84
	II	0,75	0,81
	III	0,74	0,98
CN LVdf ⁽²⁾	I	-	3,60
	II	-	3,59
	III	-	3,50

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; LVdf = Latossolo Vermelho Distroférrico típico.

⁽²⁾ Este sistema não foi amostrado em 1999.

APÊNDICE 13. Teor de carbono total no solo, em percentagem, dos nos sistemas solo sobre PVd. Médias de 6 repetições das coletas dos anos de 1999 e 2000.

Sistemas Solo	Carbono total (%)
CN PVd ⁽¹⁾	1,79 a ⁽²⁾
pc am	0,97 d
pc avmc	1,22 bc
sd am	1,22 bc
sd avmc	1,59 a
pangola	1,34 b
guandu/m	1,65 a
lablab/m	1,57 a
descoberto	1,16 bcd
lavoura	1,03 cd

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVd = Argissolo Vermelho Distrófico típico; pc = preparo convencional; sd = semeadura direta; a = aveia; m = milho; v = vica; c = caupi.

⁽²⁾ Letras minúsculas comparam sistemas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

APÊNDICE 14. Teor de carbono total no solo, em percentagem, dos sistemas solo sobre PVAd. Médias de 6 repetições das coletas dos anos de 1999 e 2000.

Sistemas Solo	Carbono total (%)
CN PVAd ⁽¹⁾	1,53 a ⁽²⁾
sem adição	0,82 b

⁽¹⁾ CN = campo nativo; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

⁽²⁾ Letras minúsculas comparam sistemas pelo teste de Tukey a 5% de significância.