

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA  
FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS – UNESP,  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SISTEMAS DE USO E MANEJO DO SOLO: ACÚMULO DE  
CARBONO E ATRIBUTOS FÍSICOS**

**Getulio de Freitas Seben Junior  
Engenheiro Agrônomo**

**2013**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA  
FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS – UNESP,  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SISTEMAS DE USO E MANEJO DO SOLO: ACÚMULO DE  
CARBONO E ATRIBUTOS FÍSICOS**

**Getulio de Freitas Seben Junior**

**Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Corá**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

**2013**

S443s Seben Junior, Getulio de Freitas  
Sistemas de uso e manejo do solo: acúmulo de carbono e atributos físicos / Getulio de Freitas Seben Junior. – – Jaboticabal, 2013  
x, 88 p.: il. ; 28 cm

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013  
Orientador: José Eduardo Corá  
Banca examinadora: Vilson Antonio Klein, Maria Helena Moraes, Carolina Fernandes, Edson Luiz Mendes Coutinho  
Bibliografia

1. Plantio Direto. 2. Física do Solo. 3. Matéria Orgânica do Solo.  
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.425:631.543

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

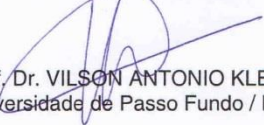
**TÍTULO:** SISTEMAS DE USO E MANEJO DO SOLO: ACÚMULO DE CARBONO E ATRIBUTOS FÍSICOS

**AUTOR:** GETULIO DE FREITAS SEBEN JUNIOR

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE EDUARDO CORA

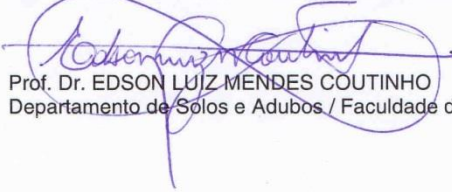
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) , pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSE EDUARDO CORA  
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. VILSON ANTONIO KLEIN  
Universidade de Passo Fundo / Passo Fundo/RS

  
Profa. Dra. MARIA HELENA MORAES  
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

  
Profa. Dra. CAROLINA FERNANDES  
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. EDSON LUZ MENDES COUTINHO  
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 25 de julho de 2013.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**GETULIO DE FREITAS SEBEN JUNIOR** – Nascido no dia 12 de outubro de 1981, em Lagoa Vermelha, RS. Título de Técnico Agrícola, pela Escola Agrotécnica Federal de Cuiabá (1997-2000). Título de Engenheiro Agrônomo, pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana (2003-2007). Durante a faculdade foi monitor (2004-2007) do grupo de pesquisa “Manejo e Conservação do Solo no Grupo de Estudos em Manejo de Áreas Protegidas e Desenvolvimento Sustentável (GEMAPE)”; bolsista de iniciação científica (PIBIC/UEMS) entre fev./2005 a jan./2006, monitor da disciplina “Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas” entre mar./2006 a jul./2006, bolsista de iniciação científica ( PIBIC/CNPq/UEMS) entre ago./2006 a jul./2007. Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) entre mar./2008 a fev./2010, pela Universidade Estadual Paulista - Câmpus de Jaboticabal, SP, sendo bolsista CAPES (mar. a jul. de 2008) e bolsista FAPESP (ago./2008 a fev./2010). Fez Doutorado “Sanduiche” em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista - Câmpus de Jaboticabal, SP e The Ohio State University (abr./2012 e abr./2013), como bolsista CAPES (mar./2010 a jul./2013). Participou do Grupo de Estudos em Manejo do Solo – Gemas (mar./2010 a jul./2013).

## Epígrafe

Hoje, neste tempo que é seu, o futuro está sendo plantado. As escolhas que você procura, os amigos que você cultiva, as leituras que você faz, os valores que você abraça, os amores que você ama, tudo será determinante para a colheita futura.

**Padre Fábio de Melo**

À minha querida mãe **Alda Emerenciana Duarte de Freitas,**  
À minha esposa **Ligia Luzia Rodrigues Nantes,**  
Aos meus amados filhos **Eduardo N. de F. Seben e Artur de Freitas Seben,**  
Pelos ensinamentos, amor e incentivo.

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

À **Deus**, por me dar o dom da vida.

À minha **mãe**, pelo apoio e amor incondicional.

À minha esposa **Ligia**, por ser minha companheira e por suprir a minha ausência perante meus filhos.

Aos meus filhos **Eduardo e Artur**, por serem o motivo da minha perseverança e de minha felicidade.

Aos meus irmãos, **Alencar, Zara, Dálquira e Aldara**, cunhados **Rosandra, Luiz Antônio e Wesley** e aos sobrinhos, **Paula, Vitória, Luiz Henrique e Isadora**, pelo apoio e carinho.

Aos meus orientadores **Prof. Dr. José Eduardo Corá** e **Dr. Rattan Lal** pela tutoria e pelos grandes ensinamentos pessoais e profissionais.

Aos **professores Dra. Carolina Fernandes, Dr. Newton La Scala Junior, Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho, Dr. Vilson Antonio Klein e Dra. Maria Helena Moraes**, por suas preciosas contribuições.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, por ter concedido bolsa de estudos no país e no exterior.

Aos colegas de Pós-Graduação **Adolfo, Ricardo, Márcio, Marcos e Priscila** pelo companheirismo e contribuições para a realização do curso.

Aos funcionários do departamento de Solos e da Fazenda, **Tiago, Célia, Mauro, Orivaldo, Ademir, Dejair, e Maria Inês, Sr. João e Marcelo**, por proporcionarem subsídios na realização deste trabalho.

Aos amigos **Norton Hayd, Adriano da Silva, Fernando Kuhnen, Alba Leonor, Kamila, André, Amélia, Cristina, Edileuza, Dna Sueli, Geverson e Flávia Vilela**, por estarem sempre me incentivando.

Às vizinhas, **Marisa e Mércia**, por se tornarem parte de nossa família.

À minha família americana, **Don e Linda Root**, por me confortarem durante minha estadia nos Estados Unidos.

Ao meu sogro, **Lúcio**, pelo respeito, amizade e por representar a figura de meu pai.

E a todos que de alguma forma contribuíram para este estudo.

**MUITO OBRIGADO!!!!**

## SUMÁRIO

|  | Página |
|--|--------|
| RESUMO.....  | ix     |
| ABSTRACT.....  | x      |
| CAPÍTULO - 1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....   | 01     |
| Introdução.....  | 01     |
| Revisão de Literatura.....   | 02     |
| Referências.....   | 12     |
| CAPÍTULO 2 - SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES AND ORGANIC CARBON OF AN<br>OXISOL UNDER LAND USE AND SOIL MANAGEMENT IN SÃO PAULO STATE,<br>BRAZIL..... | 19     |
| Summary.....   | 19     |
| Resumo.....  | 20     |
| Introduction.....  | 21     |
| Material and Methods.....  | 22     |
| Results and Discussion.....  | 24     |
| Conclusions.....   | 29     |
| Acknowledgements.....  | 29     |
| Literature Cited.....  | 30     |
| CAPÍTULO 3 - CROPPING SYSTEMS IN NO-TILL FARMING AND SOIL<br>QUALITY OF A BRAZILIAN OXISOL.....  | 41     |
| Summary.....   | 41     |
| Resumo.....  | 42     |
| Introduction.....  | 43     |
| Material and Methods.....  | 44     |
| Results and Discussion.....  | 48     |
| Conclusions.....   | 53     |
| Acknowledgements.....  | 54     |
| Literature Cited.....  | 54     |
| CAPÍTULO 4 - SEQUESTRO DE CARBONO E A AGREGAÇÃO DE UM<br>LATOSSOLO VERMELHO SOB SEQUÊNCIAS DE CULTURAS EM SISTEMA                              | 68     |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| DE SEMEADURA DIRETA.....    |    |
| Resumo.....                 | 68 |
| Summary.....                | 69 |
| Introdução.....             | 69 |
| Material e Métodos.....     | 72 |
| Resultados e Discussão..... | 74 |
| Conclusões.....             | 78 |
| Agradecimentos.....         | 78 |
| Literatura Citada.....      | 78 |

## SISTEMAS DE USO E MANEJO DO SOLO: ACÚMULO DE CARBONO E ATRIBUTOS FÍSICOS

**RESUMO** - Os solos tropicais sob mata nativa (MN) apresentam uma redução acentuada no estoque de carbono orgânico (CO) e, conseqüentemente, na sua qualidade estrutural, após a conversão para sistemas de manejo, como o sistema de cultivo convencional do solo (SCC) e o sistema de semeadura direta (SSD). Entretanto, a redução na mobilização do solo associado ao cultivo intensivo e diversificado de plantas em seqüências de culturas pode incrementar CO no solo e proporcionar melhorias à qualidade estrutural do solo. Assim, os objetivos deste estudo foram: i) avaliar a dinâmica do CO e os atributos físicos do solo sob SCC e SSD em comparação à MN; ii) avaliar o efeito de seqüências de culturas em SSD, por oito anos, sobre a dinâmica do CO e os atributos físicos do solo, e iii) avaliar o efeito de seqüências de culturas em SSD, por nove anos, sobre a dinâmica do CO e, os efeitos deste, sobre a agregação do solo. Foi amostrado a camada de 0 – 10 cm de um Latossolo Vermelho argiloso. Os sistemas de uso e manejo avaliados foram: MN (fragmento de Mata Atlântica); SCC (mais de 50 anos); SSD (9 anos). As seqüências de culturas em SSD foram: três culturas de verão: milho/milho (MM); soja/soja (SS); e soja/milho (SM); e, sete culturas de inverno: milho, girasol, nabo forrageiro, milheto, feijão guandu, sorgo e crotalária, conduzidas seguindo o delineamento experimental em faixas, com três repetições. O SSD e o SCC reduziram o conteúdo e o estoque de CO, o índice de estabilidade de agregados (IEA), o diâmetro médio geométrico (DMG), a porosidade total (PT), a macroporosidade (MA) e o intervalo hídrico ótimo (IHO) e incrementaram a densidade do solo (DS) e a resistência tênsil dos agregados (RT) do solo em comparação à MN. O SSD incrementou o IEA, o DMG, a DS, a RT e microporosidade (MI) e reduziu a PT e a MA do solo em comparação ao SCC. O solo sob MN não apresentou limites para o IHO. O solo sob SCC apresentou DS crítica igual a  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$  e sob SSD igual a  $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ . Após oito anos de cultivo das seqüências de culturas, o SM e o MM proporcionaram os maiores DMG (3,63 e 3,55 mm). O MM proporcionou o maior conteúdo ( $17,07 \text{ g kg}^{-1}$ ), estoque ( $15,70 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e taxa de sequestro de CO ( $0,70 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). O feijão guandu proporcionou a maior PT ( $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). A crotalária proporcionou os maiores IEA (93,74 %), conteúdo de CO ( $16,82 \text{ g kg}^{-1}$ ) e taxa de sequestro de CO ( $0,67 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). O milho e o feijão guandu cultivados em SM incrementaram o IHO devido às reduções na resistência do solo à penetração com o incremento da DS. Após nove anos, foi verificado que as fabáceas, SS e a crotalária, proporcionaram as maiores taxas de sequestro de CO ( $0,68$ , e  $0,79 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) que apresentou alta correlação com o conteúdo de nitrogênio ( $r = 0,94$ ,  $P < 0,01$ ,  $n = 63$ ). Milho no verão e o sorgo no inverno proporcionaram a maior agregação do solo. A agregação do solo apresentou baixa correlação com o CO determinado na fração CO particulado fino ( $r = 0,32$ ,  $P < 0,01$ ,  $n = 63$ ).

**Palavras-chave:** matéria orgânica, rotação de culturas, plantas de cobertura, agregação do solo, intervalo hídrico ótimo, fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo

## USE AND MANAGEMENT SYSTEMS: CARBON ACCUMULATION AND PHYSICAL ATTRIBUTES

**ABSTRACT** - Soils of the tropics under native forest (NF) exhibit a marked reduction in soil organic carbon (SOC) and also the structural quality after conversion to management systems, such as conventional tillage system (CT) and the no-tillage system (NT). However, absence of soil mobilization associated with an intense/diverse cropping sequence can return SOC into the soil and enhance soil structural quality. Thus, the objectives of this study were: i) evaluate the SOC dynamic and soil physical attributes under CT and NT in comparison than soil under NF; ii) evaluate the effects of cropping sequences in NT, after eight years, on SOC dynamic and soil physical attributes; and iii) evaluate the effect of cropping sequences in NT, after nine years, on SOC dynamic and its influences on soil aggregation. The soil studied was a clayey Oxisol at 0 to 10 cm depth. The use and management systems were: NF (Mata Atlântica forest); CT (more than 35 years); and NT (9 years). The cropping sequences were compost by three summer crops: corn/corn (CC); soybean/soybean (SS); and soybean/corn, and by seven winter crops: corn, sunflower, oilseed radish, pearl millet, pigeon pea, grain sorghum and sunn hemp, carried out according to a split-block design, with three replications. The NT and CT decreased SOC content and stock, water stable aggregates (WSA) mean weight diameter of soil aggregates (MWD), total soil porosity (TP), macroporosity (MA), and the least limiting water range (LLWR), and increased soil bulk density (BD) and tensile strength (TS) than those under NF. Soil under NT had higher MWD, BD, TS and microporosity (MI) but, smaller TP and MA than those under CT. Soil under NF did not attain critical values for LLWR. Soil under CT presented critical BD of  $1.46 \text{ Mg m}^{-3}$  and under NT of  $1.40 \text{ Mg m}^{-3}$ . After eight years, soil under SC and CC had higher MWD (3.63 and 3.55 mm, respectively). Soil under CC had the highest SOC content ( $17.07 \text{ g kg}^{-1}$ ), stock ( $15.70 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and rate of sequestration ( $0.70 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) among summer crops. Soil under pigeon pea had the highest TP ( $0.50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Soil under sunn hemp had the highest WSA (93.74 %), SOC content ( $16.82 \text{ g kg}^{-1}$ ) and rate of SOC sequestration ( $0.67 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ). Within SC, corn and pigeon pea increased LLWR since soil penetration resistance decreased with increase in BD. After nine years, the fabáceas plant SS and sunn hemp increased the rate of SOC sequestration ( $0.68$  and  $0.79 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) by addition of nitrogen ( $r = 0.94$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 63$ ). Both, corn as summer crop and sorghum as winter crop increased soil aggregation. Soil aggregation was slightly correlated with SOC determined in the fraction SOC associated to minerals.

**Keywords:** soil organic matter, crop rotation, cover crops, soil aggregates, least limmiting water range, soil physical fractionation of the soil organic matter

## **CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais**

### **1. INTRODUÇÃO**

O solo é um sistema natural e não renovável, essencial a todos os ecossistemas, portanto, a manutenção de sua qualidade é de vital importância para a sobrevivência dos seres vivos. O solo sob vegetação nativa apresenta um equilíbrio entre as adições e as perdas de carbono orgânico (CO), contudo, a adição constante de CO proporciona a proteção da superfície do solo, cria um ambiente com menores oscilações de temperatura e umidade e favorece a proliferação de microrganismos. Estes fatores contribuem para a formação dos agregados do solo, que são as menores unidades estruturais e que determinam o comportamento do solo quanto aos movimentos de ar, água e nutrientes, bem como o desenvolvimento radicular.

A partir do momento em que a vegetação natural é removida e o solo passa a ser preparado para o cultivo agrícola, o equilíbrio natural deixa de existir e o solo tende a um novo equilíbrio em função das novas condições impostas. A qualidade do solo pode diminuir com o aumento da mobilização do solo. O revolvimento do solo, sob sistema de cultivo convencional (SCC) causa a quebra dos agregados do solo que disponibilizam o CO, anteriormente protegido fisicamente, à degradação. A redução de CO no solo diminui a capacidade de formação de novos agregados, que resulta na degradação do solo. Os processos de degradação física do solo estão relacionados com o adensamento das partículas do solo, resultando na redução da infiltração de água no solo e no aumento do escoamento superficial, que causam a erosão do solo, além do aumento da resistência do solo à penetração pelas raízes e da redução da aeração do solo.

As práticas conservacionistas de manejo do solo, como o sistema de semeadura direta (SSD), têm sido adotadas com o objetivo de amenizar a degradação do solo e até mesmo recuperar a qualidade do solo às condições semelhantes às verificadas sob vegetação nativa, devido à adição de CO à superfície do solo, à redução na mobilização do solo e ao cultivo diversificado de

plantas. Os resíduos protegem a superfície do solo contra o selamento superficial e ciclam nutrientes no solo, que estimulam os microrganismos que atuam na formação de agregados. Entretanto, os benefícios proporcionados pelas práticas conservacionistas à qualidade estrutural dos solos, por meio da adição de CO, estão diretamente relacionados com a diversidade das espécies de plantas e com sua intensidade de cultivo, as quais determinarão a quantidade e a qualidade dos resíduos adicionados ao solo e os efeitos diretos na formação dos agregados do solo pela ação dos sistemas radiculares.

As alterações causadas à estrutura do solo pelos sistemas de uso e manejo do solo devem ser avaliadas por meio dos atributos físicos do solo, os quais, estão diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas e com a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Portanto, a hipótese deste estudo foi que o SCC degrada a qualidade estrutural do solo e que o SSD, mediado pelas sequências de culturas, recupera a estrutura do solo a condições similares às verificadas no solo sob vegetação nativa. Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi avaliar os impactos no conteúdo de CO e nos atributos físicos do solo, causados pelos sistemas de uso e manejo do solo. Os objetivos específicos foram: i) avaliar o impacto do SCC e de SSD sobre o conteúdo de CO e as propriedades físicas do solo; ii) avaliar o efeito de sequências de culturas, em SSD, sobre o conteúdo de CO e as propriedades físicas do solo; e, iii) avaliar o efeito das sequências de culturas sobre a dinâmica do CO e do nitrogênio (N) e seus impactos na agregação do solo.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

O estoque global de carbono orgânico (CO) contido nos solos é cerca de três vezes maior que o conteúdo de CO presente na atmosfera, sendo que, no primeiro 1 m estão contidos 1590 Pg (Pg =  $10^{15}$  g) de CO (LAL, 2012) e a maior parte, em torno de 800 Pg, está contida nos primeiros 30 cm (CERRI et al., 2006). Neste contexto, o solo pode atuar como fonte ou dreno de CO para a atmosfera, com

efeitos diretos nas mudanças ambientais globais (LAL, 2004), em função dos sistemas de uso e manejo que abrangem 37 % dos solos globais (SMITH et al., 2008). A redução do conteúdo de CO acelera a degradação da estrutura do solo, dada pelo incremento na densidade e pela diminuição da agregação, do armazenamento de água e da aeração do solo (FAGERIA, 2012), proporcionando a redução da produtividade das culturas (FUENTES et al., 2009). Portanto, estudos devem ser realizados para identificar o impacto dos sistemas de uso e manejo do solo sobre o sequestro de CO, visando às melhorias da qualidade do solo.

Em condições naturais, o solo sob vegetação nativa se encontra em equilíbrio entre as quantidades adicionadas de CO e as perdas por mineralização, oxidação, lixiviação e erosão (PAUSTIAN et al., 2000). Entretanto, a conversão do solo sob vegetação nativa para sistemas de cultivos agrícolas pode causar a redução no estoque de CO de 75 % em solos tropicais (LAL, 2004), elevando as emissões de gases de efeito estufa (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010), que representam a segunda maior fonte de emissão de CO para a atmosfera, atrás apenas da emissão ocasionada pela queima de combustíveis fósseis (DON; SCHUMACHER; FREIBAUER, 2011). No Brasil, as mudanças no uso do solo são responsáveis por cerca de 70 % da emissão de gases de efeito estufa (BRASIL, 2009). As perdas de CO após o desflorestamento tendem a se estabilizar e atingem um novo equilíbrio, em função das condições climáticas, das características do solo, das plantas cultivadas e dos sistemas de uso e manejo do solo (LAL, 2005).

O sistema de cultivo convencional (SCC) é a prática mais adotada mundialmente, contudo, em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos, esta prática está associada a redução da qualidade do solo devido a sua intensa mobilização (RESCK et al., 1999). A mobilização do solo, para o preparo da cama de semeadura, acelera a degradação do CO (URQUIAGA et al., 2010; CALONEGO et al., 2012) por causar a quebra dos agregados, disponibilizando o CO à degradação microbiana (BAYER et al., 2006; ZOTARELLI et al., 2007; DUNGAIT et al., 2012); por aumentar a oxigenação do solo; por estimular a atividade microbiana e por incorporar os resíduos das plantas no solo (ROSCOE; BUURMAN, 2003). A remoção dos resíduos da superfície do solo pela incorporação favorece as perdas de solo por erosão (URQUIAGA et al., 2010) incrementa a taxa de

degradação dos resíduos (SIX et al., 2002; ZOTARELLI et al., 2007) e causa o incremento da temperatura do solo (ROSCOE; BUURMAN, 2003). Sá et al. (2013) determinaram reduções no estoque de CO a uma taxa de  $0,67 \text{ Mg CO ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em um Latossolo Vermelho sob monocultivos anuais (verão) de soja ou de algodão em SCC, comparado ao solo sob vegetação nativa de Cerrados.

Para reverter o processo de degradação dos solos tropicais, o sistema de semeadura direta (SSD) está sendo adotado, como uma técnica conservacionista, em substituição ao SCC, devido aos seus benefícios econômicos, ambientais e sociais (DERPSCH, 1999). A importância do SSD para a manutenção e melhoria da qualidade do solo está fundamentada na reduzida mobilização do solo, na manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo e na rotação de culturas. No SSD, a mobilização do solo é restrita ao corte superficial para a realização da semeadura (METAY et al., 2007), assim, a menor perturbação do solo reduz a quebra dos agregados e a susceptibilidade do CO à degradação (SIX et al., 2002; ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2009) e favorece o acúmulo de CO devido à manutenção da estrutura do solo para a formação de macroagregados, que por sua vez, atuam na proteção física do CO adicionado pelos resíduos vegetais (ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2009; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). Os resíduos vegetais sobre a superfície do solo evitam o selamento superficial, reduzem a velocidade de escoamento da água e aumentam sua infiltração no perfil do solo, reduzindo as perdas de CO por erosão (METAY et al., 2007; ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2009). A rotação de culturas, por sua vez, contribui para a adição de resíduos ricos em CO (LAL, 2004; DIECKOW et al., 2009; ASSIS et al., 2012; TIVET et al., 2013).

A adoção do SSD, a partir do SCC, proporciona o incremento do estoque de CO, em média, em  $0,35 \text{ Mg CO ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , em Latossolos franco arenosos, e de  $0,60 \text{ Mg CO ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , em Latossolos argilosos (BAYER et al., 2006). Entretanto, alguns autores relataram que o SSD não é efetivo em incrementar CO no solo, se a quantidade e a qualidade dos resíduos vegetais adicionados for baixa (BAYER et al., 2006; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). Em regiões de clima tropical, a produtividade de resíduos pelas plantas de cobertura é prejudicada pela escassez de chuvas durante o seu cultivo, no outono-inverno (BAYER et al., 2006; MARTINS

et al., 2009). Portanto, para o SSD proporcionar o incremento de CO em solos tropicais, é necessário utilizar um intenso esquema de sequências de culturas, com alta diversidade e complexidade, para produzir resíduos em quantidade e qualidade suficientes para superar as grandes perdas de CO (SIX et al., 2002; BAYER et al., 2006; SÁ; LAL, 2009; BODDEY et al., 2010; BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; SÁ et al., 2013; TIVET et al., 2013; CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). Assim, Sá et al. (2013) relataram que o acúmulo de CO no solo pode chegar a 1,30 Mg CO ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Para estabelecer um complexo esquema de sequências de culturas, que seja efetivo em incrementar CO no solo, é necessário selecionar espécies de plantas com base em sua adaptação às condições edafo-climáticas regionais (MARTINS; ANGERS; CORÁ, 2012a). Além disso, as plantas devem ser escolhidas pela capacidade de produzir grandes quantidades de resíduos, pelo rápido desenvolvimento e fácil manejo, que possuam um sistema radicular profundo e resistentes à doenças, que não causem infestação e que possam proporcionar retorno econômico (MARCELO et al., 2009). As plantas mais utilizadas em sequências de culturas são aquelas pertencentes às fabáceas e às poáceas (ZOTARELLI et al., 2007; BODDEY et al., 2010), entretanto, os estudos de sequências de culturas que visam a alta complexidade não devem ficar restrito a estas (SILVA et al., 2011). Assim, as crucíferas aparecem como alternativas à diversificação de espécies. Entre as opções de culturas para condições de clima tropical, as fabáceas, crotalária e feijão guandu, e a brássica, nabo forrageiro, são utilizadas por produzirem grandes quantidades de resíduos, ricos em CO e N, com baixa relação C:N e um vigoroso sistema radicular capaz de penetrar em camadas mais adensadas do solo, proporcionando a formação de uma rede de poros contínuos e estáveis, e de reciclar nutrientes à cultura subsequente (ZOTARELLI et al., 2007; BODDEY et al., 2010; MARCELO et al., 2009; SILVA et al., 2011). As poáceas, por sua vez, são utilizadas por sua dupla aptidão: produção de grãos e de resíduos. O milho e o sorgo (grãos) e o milheto (planta de cobertura) são utilizadas por produzirem grandes quantidades de resíduos, com alta relação C:N, protegendo a superfície do solo e disponibilizando nutrientes ao solo lentamente, e por apresentar um denso sistema radicular, bem distribuído no perfil do solo e com

constantes renovações, favorecendo a adição de CO em profundidade e a formação de agregados (SILVA; MIELNICZUK, 1997; ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2009; MARTINS et al., 2009; MARCELO; CORÁ; FERNANDES, 2012; MARTINS; ANGERS; CORÁ, 2012a).

Outra opção é o girassol (asterácea), por ser uma planta tolerante à baixa precipitação, com dupla aptidão (grãos e resíduo), por adicionar grandes quantidades de CO ao solo e, produzir grandes quantidades de resíduos, embora com baixa porcentagem de cobertura do solo, uma vez que, os resíduos são compostos basicamente por caules muito resistentes, com relação C:N em torno de 81 (SODRÉ FILHO et al., 2004; SILVA et al., 2011).

As plantas cultivadas em sequências de culturas nos sistemas de uso e manejo do solo contribuem diferentemente para a adição de CO ao solo, entretanto, a fixação deste CO depende de outros fatores, entre eles: a estabilização bioquímica, a união com as partículas de argila e a proteção física pelos agregados do solo (von LUTZOW et al., 2006). Portanto, o acúmulo de CO e a agregação do solo são interdependentes e diretamente correlacionados (TISDALL; OADES, 1982; ZOTARELLI et al., 2007; MARTINS et al., 2009). Six et al. (2004) abordaram, em uma revisão de literatura, a história da evolução dos modelos teóricos que descrevem a relação entre o CO e a agregação do solo. Inicialmente, foi relatado que o CO do solo é o responsável pela estabilização dos microagregados do solo, formados por domínios de argila orientadas e por partículas de quartzo (EMERSON, 1959), assim, as moléculas orgânicas são protegidas, por estarem aderidas à superfície dos colóides do solo, e se estabilizam entre os domínios de argila do solo, por meio dos ligantes Al, Fe e H (EMERSON, 1977). Edwards e Bremner (1967) propuseram que os microagregados são resultantes de uma reação envolvendo moléculas orgânicas e metálicas, cátions polivalentes (Ca, Fe e Al) e partículas de argila. Segundo Edwards e Bremner (1967) o CO é complexado dentro dos microagregados do solo e deveria ser inacessível aos microrganismos e protegido fisicamente. O próximo modelo é o conceito de hierarquia dos agregados do solo, proposto por Tisdall e Oades (1982), que relataram que para cada classe de tamanho de agregados existe um específico agente cimentante. Conforme estes autores, as partículas primárias do solo e os agregados do tamanho de silte

(< 20  $\mu\text{m}$ ) são unidos, por meio de, agentes cimentantes persistentes (como o CO humificado, os complexos catiônicos polivalentes), por óxidos e por aluminossilicatos, no interior dos microagregados (20 - 250  $\mu\text{m}$ ), que se unem dentro dos macroagregados do solo (> 250  $\mu\text{m}$ ), por meio de agentes cimentantes temporários (raízes e hifas de fungos) e transientes (polissacarídeos derivados de microrganismos e de plantas). Contudo, Oades (1984) relatou que a agregação do solo é formada dos menores para os maiores agregados, e propôs que os macroagregados se aderem ao redor de raízes e hifas de fungos, que após a senescência se tornam núcleos para a formação de microagregados dentro dos macroagregados, proporcionando a proteção física do CO à degradação (ELLIOTT, 1986). Elliott (1986) foi o primeiro a estudar a proteção física do CO pelos agregados do solo, relatando que os macroagregados protegem o CO com maior labilidade e os microagregados protegem o CO mais recalcitrante. Este autor também foi o primeiro a relatar a ação da mobilização do solo sobre a quebra dos agregados e as perdas de CO. Desde então, muitos estudos tem sido conduzidos para avaliar o efeito do acúmulo de CO na agregação do solo e, o papel da agregação na proteção desse CO. A quantificação desta relação é fundamental para prever as mudanças no ecossistema influenciada pelos sistemas de uso e manejo do solo (SIX et al., 2004).

A avaliação da dinâmica do CO e seus impactos sobre a agregação do solo pode ser realizada por meio da sua distribuição em classes de tamanho, por meio do fracionamento físico granulométrico do solo (CAMBARDELLA & ELLIOT, 1992). O fracionamento do CO, em CO particulado (COP) e CO associado aos minerais (COAM), permite o estudo de sua recalcitrância, da capacidade de fixação no solo e de seus benefícios à qualidade estrutural do solo (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; BAYER et al., 2004; BRIEDIS et al., 2012; MARTINS; ANGERS; CORÁ, 2013). A fração COP é a fração mais lábil do solo e, portanto, mais sensível aos efeitos de manejo, sendo considerada um importante indicador de qualidade do solo (BAYER et al., 2009; CAMPOS et al., 2011; FIGUEIREDO et al., 2013). O conteúdo de CO e N na fração COP está representado por resíduos metabólicos e estruturais, carboidratos solúveis e enzimas exocelulares, com tamanho entre 250 - 2000  $\mu\text{m}$  (LAL, 2005) e é dependente da quantidade, da qualidade e da frequência com que os resíduos são adicionados ao solo (SÁ et al., 2001; BRIEDIS et al., 2012). Por

outro lado, a fração COAM contém o C e o N com maior recalcitrância e, geralmente, concentra a maior parte do C total do solo (CAMPOS et al., 2011; MARTINS; ANGERS; CORÁ, 2012b). A fração COAM é formada por partículas < 53 µm, principalmente, os ácidos húmicos e fúlvicos e os complexos orgânominerais (LAL, 2005). Nos Latossolos, a maior distribuição do C e do N na fração COAM é importante para o sequestro de C e para as melhorias na qualidade estrutural do solo (PARFITT et al., 1997).

Nos Latossolos, os óxidos de ferro e alumínio podem minimizar os efeitos do C para a agregação do solo (SIX et al., 2002). Desta forma, o incremento no conteúdo de argila está diretamente associado ao acúmulo de C no solo, devido ao aumento da proteção física pelos microagregados (SIX et al., 2002; ROSCOE; BUURMAN, 2003; BAYER et al., 2006). Entretanto, a maior parte dos estudos tem demonstrado que o C desempenha um papel importante na agregação dos Latossolos, e ambos, C e agregação do solo são afetados pelas espécies de plantas cultivadas nos sistemas de manejo (SIX et al., 2002; ANDRADE et al. 2009; MARTINS et al., 2009; SÁ; LAL, 2009; MARTINS; ANGERS; CORÁ, 2012a; SÁ et al., 2013; TIVET et al., 2013).

Assim como as plantas, cultivadas nos sistemas de uso e manejo do solo, afetam a adição e o acúmulo de C no solo, elas também influenciam a formação dos agregados do solo. As plantas proporcionam a agregação do solo direta e indiretamente, devido à adição de C via biomassa da parte aérea e das raízes, pela atividade radicular, pelas influências sobre os microrganismos do solo e pela influência nas oscilações do conteúdo de água no solo (ANGERS; CARON, 1998). A adição de C além de proporcionar a agregação, contribui para a redução da densidade do solo, uma vez que, os resíduos vegetais apresentam densidade inferior às partículas minerais do solo, além disso, incrementa a porosidade inter e intragregado, responsáveis pela dinâmica da água e dos gases no solo (BAYER; MIELNICZUCK, 2008). A agregação do solo e os espaços porosos determinam as propriedades físicas do solo e estão diretamente relacionados com a qualidade estrutural do solo (SILVA et al., 2009). A qualidade estrutural é determinada pelos atributos físicos do solo que afetam direta (conteúdo de água, disponibilidade de oxigênio e resistência do solo à penetração), e indiretamente (densidade, agregação

e porosidade do solo) o desenvolvimento das plantas (LETEY, 1985). Assim, os atributos físicos do solo devem ser utilizados para avaliar os impactos causados pelos sistemas de uso e manejo do solo em comparação ao solo sob condições nativas.

O solo sob condições naturais apresenta ótima qualidade estrutural ao desenvolvimento das plantas (CALONEGO et al., 2012), entretanto, a conversão para sistemas de manejo causa a redução da qualidade (SPERA et al., 2004). Tormena, Fidalski e Rossi Junior (2008a) avaliaram a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho franco-arenoso sob sistemas de uso (mata nativa, pousio e SCC) e observaram que a resistência tênsil dos agregados, a friabilidade do solo, o conteúdo de CO e a densidade do solo representaram a redução da qualidade estrutural do solo, proporcional à intensidade de mobilização do solo. A degradação da qualidade estrutural do solo também pode estar relacionada com a compactação do solo, a qual causa o adensamento do solo, incrementa a resistência do solo à penetração das raízes, reduz a porosidade do solo e restringe o movimento de água e ar no perfil do solo, em comparação ao SSD e SCC (CALONEGO et al., 2012).

A compactação do solo sob sistemas de manejo ocorre devido ao tráfego de máquinas, devido à utilização de implementos de preparo do solo ou pela acomodação natural das partículas do solo. Nos solos sob SSD, a camada compactada ocorre superficialmente, enquanto que em solos sob SCC a compactação ocorre em subsuperfície (CALONEGO et al., 2012). A compactação do solo altera o desenvolvimento radicular das plantas, o volume de solo exporado e o acesso à água e nutrientes, acarretando reduções na produtividade das culturas (KAISER et al., 2009). A magnitude da compactação do solo depende de fatores externos, como o tipo, a intensidade e a frequência com que a carga é aplicada, e de fatores internos, como a umidade, a textura, a estrutura, a densidade inicial do solo e o conteúdo de CO.

No solo sob SSD, a compactação ocorre principalmente na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade e é decorrente da ausência do revolvimento do solo, e do efeito cumulativo do tráfego de máquinas e implementos (BOTTEGA et al., 2013), que se traduzem em elevação da densidade do solo (BEUTLER et al., 2001), elevação da resistência do solo à penetração (BEUTLER et al., 2001; KLEIN et al.,

2008) e diminuição da porosidade de aeração do solo (BEUTLER et al., 2001; KLEIN et al., 2008). Contudo, a compactação do solo sob SSD pode ser amenizada pela utilização de plantas que apresentem sistema radicular pivotante, bem desenvolvido e capaz de se desenvolver em camadas mais adensadas do solo, formando bioporos estáveis que favorecem a movimentação de água e ar e a criação de caminhos preferenciais ao desenvolvimento radicular da cultura subsequente (TORMENA et al., 2008b; KAISER et al., 2009). Além disso, as plantas que adicionam grandes quantidades de resíduos, ricos em CO, contribuem para a agregação do solo e, conseqüentemente, melhorias à qualidade estrutural, tornando o SSD um sistema de produção sustentável (SÁ et al., 2013).

Tormena et al. (2008b) avaliaram a qualidade física de um Latossolo Vermelho argiloso sob SSD com sucessão de culturas (soja-trigo), com rotação de culturas (milho-aveia-soja-aveia-soja-trigo) e com escarificação mecânica e, observaram que o solo sob SSD com rotação apresentou os maiores valores de resistência tênsil, devido à diversidade das plantas em rotação, e que a rotação de culturas pode ser utilizada em substituição à escarificação mecânica do solo por proporcionar efeitos mais duradouros. Da mesma forma, Nicoloso et al. (2008) compararam a eficiência da escarificação mecânica e biológica em um Latossolo, por meio do cultivo de nabo, e verificaram que o nabo proporcionou o incremento da macroporosidade e da infiltração de água no solo, reduziu a resistência à penetração do solo e incrementou a produtividade de soja cultivada em sequência, por outro lado, a escarificação mecânica proporcionou efeito temporário e não melhorou a qualidade estrutural do solo após nove meses. Entretanto, Klein et al. (2008) avaliaram os efeitos da escarificação em um Latossolo Vermelho sob SSD cultivado com uma rotação de culturas envolvendo soja e milho no verão e aveia, ervilhaca e trigo, no inverno, e verificaram que a escarificação esporádica do solo sob SSD reduz a densidade do solo em 5 %, incrementa a porosidade total e o volume de poros livres de água em 7,6 %, resultando no incremento da produtividade de grãos de trigo em 682 kg ha<sup>-1</sup>. Na mesma área de estudos, Klein, Baseggio e Madalosso (2009) também observaram que a escarificação do solo proporcionou a redução da resistência do solo à penetração, resultando em melhorias à qualidade do solo.

Reinert et al. (2008) relataram que os benefícios das plantas em promover a escarificação biológica do solo deixam de ser efetivos para solos compactados que apresentem valores limitantes de densidade do solo. Em solos com baixo conteúdo de água, a coesão das partículas do solo e a resistência do solo à penetração são elevadas e reduzem a pressão hidrostática das células das raízes e, conseqüentemente, reduz a força da coifa, na região meristemática da raiz, para superar a resistência do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005). Os valores limitantes de densidade do solo ao desenvolvimento radicular podem ser determinados por meio do intervalo hídrico ótimo (IHO). O IHO é um importante parâmetro para avaliar a qualidade estrutural do solo ao desenvolvimento das plantas, pois envolve a avaliação conjunta do potencial matricial de água no solo, da resistência do solo à penetração e da porosidade de aeração do solo, considerando a variabilidade natural da densidade do solo (LETEY, 1985; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; SILVA; KAY; PERFECT, 1994). O IHO representa uma faixa de água, dentro da qual as plantas se desenvolvem com as mínimas limitações impostas pelos atributos físicos do solo, contudo, fora desta faixa, as plantas sofrem severas restrições (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

Blainski et al. (2012) avaliaram o IHO de um Latossolo argiloso afetado pela rotação de culturas em SSD (soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno), bem como pela quantidade de resíduos de aveia (0, 3, 6, 9 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>), e observaram que os resíduos contribuíram para o amplitude do IHO mas, isto não proporcionou melhorias na qualidade do solo às plantas para valores de densidade do solo próximo aos valores de densidade crítica igual a 1,36 Mg m<sup>-3</sup>. Os valores limitantes de densidade ao desenvolvimento radicular são considerados, aqueles valores de densidade do solo acima do valor de densidade crítica (quando o IHO é igual a zero), os quais indicam que o solo apresenta severa degradação estrutural, causando restrições ao desenvolvimento radicular das plantas (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA et al., 2007). Contudo, a densidade crítica do solo pode ser controlada por meio de rotações de culturas. Calonego e Rosolem (2011) avaliaram os efeitos da escarificação e da rotação de culturas por três anos, envolvendo: triticales e girassol no outono-inverno e milheto, sorgo e crotalária como plantas de cobertura anterior ao cultivo da soja, sobre a qualidade de um Nitossolo

Vermelho, por meio do IHO, e verificaram que a escarificação do solo e as rotações de culturas girassol e crotalária, triticales e milho e triticales e crotalária, em SSD, são eficientes em melhorar a qualidade do solo.

Com base no exposto, a avaliação dos impactos proporcionados pelos sistemas de uso e manejo sobre a qualidade estrutural do solo, principalmente em solos tropicais altamente intemperizados, é fundamental para avaliar a sustentabilidade dos sistemas de produção com relação ao solo em estado natural, sob condições nativas. Em SSD ainda são poucos os estudos de longa duração envolvendo diferentes espécies de plantas em rotação de culturas, com ausência de escarificação do solo, principalmente, em regiões com escassez de chuvas coincidindo com o período de desenvolvimento das plantas de cobertura.

### 3. REFERÊNCIAS

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.411-418, 2009.

ANGERS, D.A.; CARON, J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. In: van BREEMEN, N. **Plant-induced soil changes: Processes and feedbacks**. Springer Netherlands, 1998. p. 55-72.

ASSIS, C.P.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; SILVA, L.H.M.; WENDLING, B. Distribution and quality of the organic matter in light and heavy fractions of a Red Latosol under different uses and management practices. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v.43, n.5, p.835-846, 2012.

BATLLE-BAYER, L.; BATJES, N.H.; BINDRABAN, P.S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.137, n.1, p.47-58, 2010.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metropole, 2008. cap. 2, p. 7-18.

BAYER, C.; DIECKOW, J.; AMADO, T.J.C.; ELTZ, F.L.F.; VIEIRA, F.C.B. Cover crop effects increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v.40, n.9-10, p.1499-1511, 2009.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, 677-683. 2004.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.86, n.2, p.237-245, 2006.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.167-177, 2001.

BLAINSKI, É.; NANNI, M.R.; GUIMARÃES, R.M.L.; TORMENA, C.A. Qualidade física de um latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.79-87, 2012.

BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; CONCEICAO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Oxford, v.16, n.2, p.784-795, 2010.

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.; PINTO, F.; SOUZA, C. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.44, n.1, p1-9, 2013.

BRASIL. **Ministério de Ciência e Tecnologia. Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. Brasília, DF. 2009. p.19.

BRIEDIS, C.; SÁ, J.C.M.; CAIRES, E.F.; NAVARRO, J.F.; INAGAKI, T.M.; BOER, A.; FERREIRA, A.O.; NETO, C.Q.; CANALLI, L.B.; SANTOS, J.B. Changes in Organic Matter Pools and Increases in Carbon Sequestration in Response to Surface Liming in an Oxisol under Long-Term No-Till. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.76, n.1, p.151-160, 2012.

CALONEGO J.C.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.3, p.759-771, 2011.

CALONEGO, J.C.; SANTOS, C.H.; TIRITAN, C.S.; JÚNIOR, J.R.C. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.25, n.2, p.128-135, 2012.

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

CAMPOS, B.H.C.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R.S.; FIORIN, J.E. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.3, p.805-817, 2011.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P.; LAL, R.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. **Carbon sequestration in soils of Latin America**, New York: Haworth Press, 2006. cap. 2, p. 41-47.

CONCEIÇÃO, P.C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.129, n.3-4, p.40-47, 2013.

DERPSCH, R. Frontiers in conservation tillage and advances in conservation practice. In: 10th International Soil Conservation Organization Meeting, 1999, West Lafayette. **Sustaining the global farm: Strategic issues, principles, and approaches**. 2001. p. 248-254.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; MARTINNETO, L.; MILORI, D.B.M.; SALTON, J.C.; MACEDO, M.M.; MIELNICZUK, J.; HERNANI, L.C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.60, n.2, p.240-249, 2009.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v.17, n.4, p.1658-1670, 2011.

DUNGAIT, J.A.J.; HOPKINS, D.W.; GREGORY, A.S.; WHITMORE, A.P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, Oxford, v.18, n.6, p.1781-1796, 2012.

EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.18, n.1, p.47-63, 1967.

ELLIOTT, E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.50, n.1, p.627-633, 1986.

EMERSON, W.W. Physical properties and structure. In: RUSSELL, J.S.; GREACEN, E.L. **Soil Factors in Crop Production in a Semi-arid Environment**. Brisbane: Queensland University Press, 1977. p. 79-104.

EMERSON, W.W. The structure of soil crumbs. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.10, n.1, p.235-244, 1959.

FAGERIA, N.K. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, Philadelphia, v.43, n.16, p.2063-2113, 2012.

FIGUEIREDO, C.; RESCK, D.V.S.; CARNEIRO, M.A.C.; RAMOS, M.L.G.; SÁ, J.C.M. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.51, n.2, p.133-141, 2013.

FUENTES M.; GOVAERTS, B.; DE LEÓN, F.; HIDALGO, C.O.; SAYRE, K.D. ; ETCHEVERS, J.; DENDOOVEN, L. Fourteen years of applying zero and

conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.30, n.3, p.228–237, 2009.

FUENTES, M.; HIDALGO, C.O.; ETCHEVERS, J.; DE LEÓN, F.; GUERRERO, A.; DENDOOVEN, L.; VERHULST, N.; GOVAERTS, B. Conservation agriculture, increased organic carbon in the top-soil macro-aggregates and reduced soil CO<sub>2</sub> emissions. **Plant & Soil**, Amsterdam, v.355, n.1-2, p.183-197, 2012.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, 2005.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.845-855, 2009.

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p.2475-2481, 2009.

KLEIN, V.A.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; MASSING, J.P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.38, n.2, p.365-371, 2008.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.60, n.2, p.158-169. 2009.

LAL, R. Climate change mitigation by managing the terrestrial biosphere. In: LAL, R.; LORENZ, K.; HÜTTL, R.F.; SCHNEIDER, B.U.; von BRAUN, J. **Recarbonization of the Biosphere**. Springer Netherlands, 2012. cap. 2, p. 17-39.

LAL, R. Soil carbon sequestration for sustaining agricultural production and improving the environment with particular reference to Brazil. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.26, n.4, p.23-42, 2005.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v.304, n.5677, p.1623-1627, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. In: **Advances in soil science**, New York: Springer, 1985. p.277-294.

MARCELO, A. V., CORÁ, J.E., FERNANDES, CO., MARTINS, M.R., JORGE, R.F. Crop sequences in no-tillage system: Effects on soil fertility and soybean, maize and rice yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.417-428, 2009.

MARCELO, A.V.; CORÁ, J.E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I - Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.5, p.1553-1567, 2012.

MARTINS, M.D.R.; ANGERS, D.A.; CORÁ, J.E. Carbohydrate composition and water-stable aggregation of an Oxisol as affected by crop sequence under no-till. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.76, n.2, p.475-484, 2012a.

MARTINS, M.D.R.; ANGERS, D.A.; CORÁ, J.E. Non-labile plant C contributes to long-lasting macroaggregation of an Oxisol. **Soil Biology & Biochemistry**, London, v.58, n.1, p.153-158, 2013.

MARTINS, M.R.; ANGERS, D.A.; CORÁ, J.E. Co-accumulation of microbial residues and particulate organic matter in the surface layer of a no-till Oxisol under different crops. **Soil Biology & Biochemistry**, London, v.50, n.1, p.208-213, 2012b.

MARTINS, M.R.; CORA, J.E.; JORGE, R.F. & MARCELO, A.V. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.104, n.1, p.22–29, 2009.

METAY, A.; MOREIRA, J.A.A.; BERNOUX, M.; BOYER, T.; DOUZET, J.M.; FEIGL, B.; FELLER, C.; MARAUX, F.; OLIVER, R.; SCOPEL, E. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.94, n.1, p.122-132, 2007.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1735-1742, 2008.

OADES, J.M. Soil organic-matter and structural stability - mechanisms and implications for management. **Plant & Soil**, Amsterdam, v.76, n.1, p.319-337, 1984.

PARFITT, R.L.; THENG, B.K.G.; WHITTON, J.S.; SHEPHERD, T.G. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. **Geoderma**, Amsterdam, v.75, n.1, p.1-12, 1997.

PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; HUNT, H.W. Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. **Biogeochemistry**, v.48, n.1, p.147-163, 2000.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.1805-1816, 2008.

RESCK, D.V.S.; VASCONCELLOS, C.A.; VILELA, L.; MACEDO, M.C.M. Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pasture land on soil carbon pool and dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; STEWART, B.A. **Global Climate Change and Tropical Ecosystems**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 169–196.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.70, n.2, p.107-119, 2003.

SÁ, J.C.D.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.65, n.5, p.1486–1499, 2001.

SÁ, J.C.M., LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.1, p.46-56, 2009.

SÁ, J.C.M., SÉGUY, L., TIVET, F., LAL, R., BOUZINAC, S., BORSZOWSKI, P.R., BRIEDIS, C., SANTOS, J.B., HARTMAN, D.C., BERTOLONI, C.G., ROSA, J., FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**. 2013.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, D.A.; SOUZA, L.D.; VITORINO, A.C.T.; GONÇALVES, M.C. Aporte de fitomassa pelas sucessões de culturas e sua influência em atributos físicos do solo no sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.147-156. 2011.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.1, p.113-117, 1997.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p.1097-1104, 2009.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.79, n.1, p.7-31, 2004.

SIX, J.; FELLER, C.O.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage. **Agronomie - Sciences des Productions Vegetales et de l'Environnement**, v.22, n.7-8, p.755-775, 2002.

SMITH, P., MARTINO, D., CAI, Z., GWARY, D., JANZEN, H., KUMAR, P., MCCARL, B., OGLE, STEPHEN, O'MARA, F., RICE, CO., SCHOLLES, B., SIROTKO, O., HOWDEN, M., MCALLISTER, T., PAN, G., ROMANENKOV, V., SCHNEIDER, U., TOWPRAYOON, S., WATTENBACH, M., SMITH, J., Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.363, n.492, p.789-813. 2008.

SODRÉ FILHO, J.; CARDOSO, A.N.; CARMONA, R.; CARVALHO, A.M. Fitomassa e cobertura do solo de culturas de sucessão ao milho na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.4, p.327-334, 2004.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.533-542, 2004.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v.33, n. 1, p.141-163, 1982.

TIVET, F.; SÁ, J.C.M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKI, P.R.; SANTOS, J.B.; FARIAS, A.; EURICH, G.; HARTMAN, D.C.; NADOLNY JUNIOR, M.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-CO inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.126, n.1, p.203-218, 2013.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.943-952. 2008b.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.33-42, 2008a.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.573-581, 1998.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R.M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: Uma análise crítica. **Informações Agrômicas**, Seropédica, n.130, p. 12-21, 2010.

von LUTZOW, M.; KOGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.57, n.4, p.426-445, 2006.

ZOTARELLI, L.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; SIX, J. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.95, n.1, p.196-206, 2007.



29 **List of abbreviations:** AP: Aeration porosity; AWC: Available water capacity; BD: Bulk  
30 density; CT: Conventional tillage system; FC: Field capacity; NF: Native Forest; GMD:  
31 Geometric mean diameter; LLWR: Least limiting water range; MA: Macroporosity; MI:  
32 Microporosity; NT: No-tillage system; NTcc: Corn/corn as summer crop in no-tillage system;  
33 NTss: Soybean/soybean as summer crop in no-tillage system; NTsc: Soybean/corn as summer  
34 crop in no-tillage system; PR: Soil penetration resistance; PWP: Permanent wilting point;  
35 SOC: Soil organic Carbon; TP: Total porosity; TS: Tensile strength of aggregates; and WSA:  
36 Water stable aggregates.

37

38 **RESUMO: ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO ORGÂNICO DE UM LATOSSOLO SOB**  
39 **SISTEMAS DE USO E MANEJO EM SÃO PAULO, BRASIL**

40

41 A qualidade física dos solos sob clima tropical está sujeita à degradação após a  
42 conversão de mata nativa em sistema de cultivo convencional (SCC). Por outro lado, a adoção  
43 do sistema de semeadura direta (SSD) proporciona melhorias na qualidade do solo. Assim, o  
44 objetivo deste estudo foi avaliar os atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob mata  
45 nativa, SCC e SSD envolvendo sequências de culturas de verão: Milho em Monocultura  
46 (SSD-MM), Soja em Monocultura (SSD-SM) e rotação soja/milho (SSD-RSM). As  
47 sequências de culturas sob SSD e o SCC proporcionaram reduções no teor de carbono  
48 orgânico, no estoque de carbono, no índice de estabilidade de agregados (IEA), no diâmetro  
49 médio ponderado (DMP), na porosidade total (PT), na macroporosidade (MP) e no intervalo  
50 hídrico ótimo (IHO), mas, incrementaram a densidade do solo (DS) e a resistência tênsil dos  
51 agregados (RT) em comparação a mata nativa. O SSD proporcionou ao solo maiores valores  
52 de IEA, DMP, DS, RT e microporosidade e menores valores de PT e MP em comparação ao  
53 SCC. O limite inferior do IHO no solo sob SSD e SCC foi a resistência a penetração para  
54 todos os valores de DS, enquanto que, o limite superior foi a porosidade de aeração para  
55 valores de DS acima de 1,46; 1,40; 1,42 e 1,41 Mg m<sup>-3</sup> no solo sob SCC, SSD-RSM, SSD-  
56 MM e SSD-SM, respectivamente. No solo sob SSD-MM e SSD-SM a redução da resistência  
57 a penetração com o aumento da DS.

58

59 **Termos de indexação:** Plantio direto, carbono orgânico do solo, intervalo hídrico ótimo  
60 agregados do solo, densidade do solo, solos tropicais.

61

62

63

## 64 INTRODUCTION

65

66 The global soil organic carbon content (SOC) are three times higher than that in the  
67 atmosphere and at the first 30 cm of the soil has about 800 Pg (Pg =  $10^{15}$  g) (Cerri et al., 2006).  
68 Thus, the soil can be a significant C sink or source to the atmosphere since 37 % of the soils  
69 are under use and management systems (Smith et al., 2008). Soils of the tropics are prone to  
70 degradation upon conversion of native forest (NF) to cropland systems (Houghton et al.,  
71 1991) through increase in intensity of soil disturbance by conventional tillage which breaks  
72 soil aggregates and exposes soil organic carbon (SOC) to decomposition (Lal, 1976).  
73 Depletion of SOC by conversion of primary NF into cropland is the second largest C source  
74 of human-induced emissions (Don et al., 2011). The magnitude of SOC depletion in soils of  
75 tropical agroecosystems may be as much as 75% or more (Lal, 2004). Reduction of SOC  
76 below the critical level exacerbates degradation of soil structure, increases bulk density (BD),  
77 decreases aggregation, reduces soil moisture storage, decreases aeration (Fageria, 2012), and  
78 adversely impacts grain yield (Fuentes et al., 2009). Loss of SOC can be reversed by using  
79 less intensive cultivation practices, and by changing from monoculture to complex rotations  
80 (West & Post, 2002). Besides, NT restores soil structure and increases SOC on an average by  
81  $0.43 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  at 0-10 cm depth in tropical soils (Six et al., 2002).

82 Adoption of NT may improve SOC content and stock by addition of crop residues on  
83 soil surface or into the soil profile by root system. Conversion of conventional tillage system  
84 (CT) to NT may increase SOC by  $57 \pm 14 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  (West & Post, 2002). Adoption of  
85 complex rotations from monoculture can increase SOC by  $20 \pm 12 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ . However,  
86 complex rotation under NT does not significantly increase SOC compared to that under CT  
87 because of SOC content is closer to a maximum steady-state level (West & Post, 2002). Also,  
88 conversion of CT to NT can enhance SOC stabilization and crop yield (Bhattacharyya et al.,  
89 2012), improve aggregation (Albuquerque et al., 1995), increases soil water reserves (Peres et  
90 al., 2010), and reduce the risks of initial compaction under NT by decreasing soil disturbance  
91 (Carter et al., 1999).

92 Management-induced changes in soil can be evaluated by assessing structural  
93 properties such as the least limiting water range (LLWR) (Silva et al., 1994). The LLWR  
94 considers the soil moisture range where no limitations to plant growth are expected when  
95 considering soil aeration porosity (AP), penetration resistance (PR), and plant available water

96 capacity (AWC) between field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) (Reichert et  
97 al., 2009). Besides LLWR, others properties may be used to evaluate soil structural quality  
98 affected by land use and soil management such as SOC content (Tivet et al., 2012), BD  
99 (Viana et al., 2011), SOC stock (Zotarelli et al., 2012), water stable aggregate (WSA)  
100 (Martins et al., 2012), geometric mean diameter (GMD) (Seben Jr. et al., 2011), PR (Silva &  
101 Kay, 2004), tensile strength (TS) (Tormena et al., 2008), and total porosity (TP),  
102 microporosity (MI) and macroporosity (MA) (Wendling et al., 2012).

103 It is important to evaluate the impacts of intensive management systems on soil  
104 structure, such as under NT in comparison with soil under NF. Continuously high  
105 precipitation and temperature may exacerbate SOC depletion, soil structure decline and  
106 reduction in agronomic production. Thus, the present study was conducted to test the  
107 hypothesis that use and management systems decreases soil structural quality compared to NF  
108 and the adoption of NT can reduce the impacts caused by intensive soil disturbance under CT  
109 and improve soil physical quality. Therefore, the specific objective of the present study was to  
110 evaluate the impacts of CT, NT and NF on soil physical quality.

111

112

## 113 MATERIAL AND METHODS

114

115 The experimental area was located in Jaboticabal - SP, Brazil (21° 15' 22'' S and 48°  
116 18' 58'' W). Climatologically, the area belongs to the tropical megathermal zone, or Köppen's  
117 Aw (a tropical climate with a dry winter and an average temperature of the coldest month  
118 higher than 18°C). The mean annual rainfall of the region (1971–2010) is 1,417 mm, with an  
119 annual distribution that peaks during October to March, with a relatively dry season from  
120 April to September (Figure 1).

121 The soil studied was an Oxisol (Rhodic Eutrudox), kaolinitic, hipoferric, based on  
122 USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010), with 381 g kg<sup>-1</sup> of sand, 556 g kg<sup>-1</sup> of clay,  
123 and 63 g kg<sup>-1</sup> of silt. Soil use and managements were: NF, CT, and NT. The NF is a fragment  
124 of Atlantic forest under climax vegetation. The CT was established after deforestation and  
125 once a year the soil was plowed and harrowed to grow mainly corn (*Zea mays* L.) or soybean  
126 (*Glycine max* (L.) Merrill) in the spring/summer and the soil kept fallow during

127 autumn/winter for more than 50 years. In September 2002, part of the area under CT was  
128 converted to NT.

129 Within NT, three summer crop sequences were established: corn/corn (NTcc);  
130 soybean/soybean (NTss); and soybean/corn (NTsc). During the autumn/winter, in each summer  
131 crop sequence seven winter crops were grown, as follows: corn, sunflower (*Helianthus*  
132 *annuus* L.), oilseed radish (*Raphanus sativus* L.), pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.)  
133 Leeke), pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)  
134 and sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.), as shown on Figure 2.

135 Soil samples within each land use and management treatments were taken from 0 to 10  
136 cm depth, during October, 2010 at 14 locations divided into two paired transects (Figure 2).  
137 Within each location grab samples were collected, as follows: two soil blocks (of 10 x 15 x 20  
138 cm height, width and length, respectively), and ten disturbed soil samples using a straight  
139 shovel. Besides, two undisturbed soil cores (5.0 cm diameter by 5.0 cm deep) were collected  
140 in each location, totaling 28 core samples for each land use and management.

141 Soil blocks were packed appropriately to preserve soil structure and moisture content.  
142 For each soil block, 40 aggregates of 12.5 - 19.0 mm diameter were obtained to determine the  
143 TS (Watts & Dexter, 1998). Aggregates were oven dried at 105 °C for 24 h, placed in a  
144 desiccator to attain the ambient temperature, weighed and subjected to the TS test by a digital  
145 dynamometer, coupled with a load cell of 20 kgf capacity and adjusted to record the  
146 maximum compressive force used to break the aggregate.

147 Twenty grab samples were obtained to form a composite sample. The composite  
148 samples were broken up and sieved manually at the antecedent moisture content at the field.  
149 Then, the composite samples were split divided into three parts. One part was used to separate  
150 aggregates between 4.0 to 6.3 mm. The second part was used to separate aggregates between  
151 1.0 to 2.0 mm. These aggregates were air-dried for 48 h. The larger aggregates were used to  
152 determine the GMD, and smaller aggregates were used to determine the WSA, both according  
153 to Nimmo & Perkins (2002). The third part was used to determine the SOC content following  
154 the method of Yeomans & Bremner (1988).

155 The GMD was determined, using 30 g of air dried aggregates transferred to a nest of  
156 sieves of 4.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25, and 0.125 mm mesh sizes. The nest of sieves with the  
157 aggregates was directly immersed (without pre-wetting) in water in an apparatus for vertical  
158 oscillation (Yoder, 1936) for 15 min, adjusted to 31 cycles min<sup>-1</sup>, with oscillation amplitude

159 of 35 mm. For determining the WSA, 10 g of air dried aggregates was transferred to a sieve  
160 with mesh of 0.25 mm, in the apparatus for vertical oscillation for 3 min, adjusted to 35 cycles  
161  $\text{min}^{-1}$ , with an oscillation amplitude of 13 mm. In addition, an appropriate correction was  
162 made for the primary particles and gravels (Kemper & Rosenau, 1986).

163 The LLWR was determined using four replications for each matric potential. Total  
164 core samples (28 cores x 5 soil use and managements) were divided into seven groups of 20  
165 samples and saturated for 48 h. Cores from each group were used to determine soil water  
166 retention at seven matric potentials: -0.006, -0.01 MPa, using a tension table (Romano et al.,  
167 2002) and at -0.033, -0.06, -0.1, -0.3 and -1.5 MPa using pressure plate extractors (Dane &  
168 Hopmans, 2002). The PR was obtained in each core at every matric potential, using a  
169 penetrometer, equipped with a linear actuator and load cell of 20 kg, operated at constant  
170 speed of  $1.76 \text{ mm s}^{-1}$ , and coupled to a computer for data acquisition (Figueiredo et al., 2011).  
171 The penetrometer cone had an angle of  $30^\circ$  and base diameter of 3.91 mm. These data were  
172 used to calculate the LLWR following the method suggested by Silva et al. (1994).  
173 Considering the limits to determine the LLWR, as follow: FC at -0.01 MPa (Reichardt, 1988),  
174 PWP at -1.5 MPa (Savage et al., 1996), PR limit for plant growth of 3.5 MPa (Tormena et al.,  
175 2007), and the limit for AP of 10% (Grable & Siemer, 1968). The empirical parameters used  
176 to adjust the equations to obtain the LLWR and the critical BD were obtained using a  
177 simplified algorithm developed in Excel<sup>®</sup> software by Leão & Silva (2004). The TP, MI and  
178 MA (Flint & Flint, 2002), and BD (Grossman & Reinsch, 2002), were obtained in each soil  
179 core.

180 The SOC stock was calculated from SOC content and BD. The SOC stock was  
181 corrected for the equivalent soil mass method (Ellert & Bettany, 1995), using the SOC content  
182 under NF as the baseline.

183 Each soil use and management was considered a randomized sample, with population  
184 equal to seven. The data were submitted to comparison of means by t test ( $\alpha < 0.01 \%$ ).

185

186

## 187 **RESULTS AND DISCUSSION**

188

189 Both CT and NT systems decreased SOC content and SOC stock in comparison to that  
190 under NF (Table 1). Conversion of NF to cropland systems ruptured aggregates by soil

191 disturbance and exposed the SOC to degradation by oxidation, mineralization or by  
192 microorganisms. Increase in access of SOC to microorganisms can enhance its decomposition  
193 (Dungait et al., 2012). Relatively higher input of biomass-C to soil under NF is attributed to  
194 continuous input and decomposition of litterfalls and roots, which is physically protected  
195 against microbial degradation within aggregates (Kleber et al., 2011). The lack of any  
196 significant difference between NT and CT for SOC content may be attributed to short  
197 duration of NT adoption, since the SOC rates after conversion from CT to NT may reach a  
198 plateau after 25 to 50 years or until the soil sink capacity is filled (West & Post, 2002; Lal,  
199 2004).

200 Rates of SOC sequestration upon conversion from CT to NT (NT<sub>sc</sub>, NT<sub>cc</sub>, and NT<sub>ss</sub>)  
201 were 0.03 Mg C ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>. Soils of the tropics, because of severe weathering, may have high C  
202 sink capacity but the rate of SOC sequestration can be low (Lal, 2004). In comparison, higher  
203 rates of SOC sequestration were reported by Bayer et al. (2006), who observed increase in  
204 SOC stock (0–20 cm) under NT by 0.30 Mg ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup> compared to CT in a sandy clay loam  
205 Oxisol and 0.60 Mg ha<sup>-1</sup>y<sup>-1</sup> in a CT clayey Oxisol, due to a smaller rate of organic matter  
206 decomposition when soils are undisturbed. In contrast, Roscoe & Buurman (2003) reported  
207 that NT reduced SOC compared to soil under CT (- 0.03 Mg ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) after 30 years because  
208 of soils of high clay and Fe + Al oxi-hydroxides contents, and to a sufficient C supply by the  
209 corn.

210 Soil aggregation decreased with increase in the intensity of soil disturbance in the  
211 order: NF > NT<sub>sc</sub> = NT<sub>cc</sub> = NT<sub>ss</sub> > CT (Table 1). These results indicate the importance of  
212 reducing soil disturbance, applying crop residues on soil surface, and adopting crop rotations.  
213 Despite no differences in SOC content among treatments, a higher aggregation under NT  
214 (NT<sub>sc</sub>, NT<sub>cc</sub>, and NT<sub>ss</sub>) in comparison to CT may be attributed to root system of species  
215 used in crop rotation compared to fallow period on soil under CT. Vezzani & Mielniczuk  
216 (2011) observed higher aggregation on soil under Pangola grass (*Digitaria decumbens*) + corn  
217 and oat (*Avena strigosa*) + corn compared to that under CT which presented lower SOC stock.  
218 The authors attributed the results to the specific properties of root system to improve soil  
219 aggregation. Vezzani & Mielniczuk (2011) also observed that a complex rotation in NT of oat  
220 + vetch (*Vicia sativa*) and corn + cowpea-beans (*Vigna unguiculata*) enhanced SOC and  
221 aggregation, approaching the values to those under NF.

222 Soil BD and TS were in the order  $NF < CT < NT_{sc}$  (Tables 1 and 2). However, these  
223 attributes under  $NT_{cc}$  and  $NT_{ss}$  did not differ from those under  $NT_{sc}$  and CT, however, had  
224 higher values of BD and TS than those under NF. High values of TS, in soil under NT may  
225 indicated a favorable seedbed with bigger aggregates in contrast to a soil with a large size  
226 range (Tormena et al., 2008). On the other hand, low TS observed in soil under NF may be  
227 attributed to smaller aggregates with higher TS forming bigger aggregates with lower TS  
228 (Imhoff et al., 2002).

229 A soil under short-term NT is expected to have a higher BD in the surface layer  
230 (Tormena et al., 2002), because of the machinery traffic and absence of soil disturbance  
231 (Tormena et al., 1998). A higher BD in soil under NT in comparison to CT and NF was also  
232 reported by Calonego et al. (2012) who attributed the trend in soil properties under NF to a  
233 lack of anthropogenic perturbation, high SOC content with low specific weight, and high  
234 natural porosity of SOM humified in an undisturbed soil. Tormena et al. (2008) reported that  
235 the quality of an Oxisol decreased proportionally to intensification of soil use ( $NF < fallow <$   
236  $CT$ ). However, soil under long-term NT tends to have a low BD because of bioturbation and  
237 impact of diverse species in complex crop rotations. Lanzanova et al. (2010) observed after 16  
238 years of NT adoption that crop rotation and cover crops reduced BD and increased TP and  
239 MA in comparison to those for a bare/unprotected soil.

240 In contrast to the trends in TS and BD, both TP and MA increased from NT ( $NT_{sc}$ ,  
241  $NT_{cc}$ , and  $NT_{ss}$ )  $< CT < NF$  (Table 2). The increase of BD under NT and the decrease of TP  
242 and MA was due to the reorientation of mineral particles. However, an increase in SOC and  
243 root system biopores of the species used in crop rotation may reverse the trend over long-  
244 term. Biopores are necessary to sustaining proper pore functions and the role of soil  
245 mechanical properties in a continuous use of NT over a long time horizon (Reichert et al.,  
246 2009). The positive effect of SOC content in enhancing soil quality was also reported for soils  
247 of Queensland, Australia by So et al. (2009). The authors, observed that soil under NT for 14  
248 years had higher MA, saturated hydraulic conductivity, water infiltration rate, plant AWC,  
249 water use efficiency, and crop yields; and lower BD, dispersible clay, and water run-off, than  
250 soil under CT.

251 The results of the present study showed higher TP and MA in soil under CT, due to  
252 soil disturbance in the surface layer, compared to NT. However, MA under CT was  
253 substantially reduced from the surface (0–10 cm) to sub-soil layers in the soil profile under

254 NT (Cássaro et al., 2011). According to Cavalieri et al. (2009) the soil pore connectivity is  
255 more important than the magnitude of TP and MA for soils under long-term NT. These trends  
256 are in accord with the observation that majority of the pores in sub-soil do not conduct water  
257 and air. At the present study, MA volume, observed in soil under NTcc and NTss, although  
258 being lower than  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , seems not to have been restrictive to plant development, as  
259 mentioned by Silva et al. (1994), as critical to a satisfactory plant growth. Sometimes, critical  
260 values of MA are not restrictive to root development and crop yield in NT because of the  
261 tolerance of the species (Reichert et al., 2009). Jemai et al. (2013) also observed that soil  
262 under CT had higher MA than that under NT at the 0 to 10 cm layer. However, seven years of  
263 NT improved MA more than three years of NT by transformation of a part of fine pores in  
264 macropores.

265 In the present study, soil under NT had higher MI than that under CT but lower than  
266 that under NF (Table 2). Increase in BD under NT, due to absence of soil disturbance,  
267 reduced MA but increased MI by reduction of pores diameter in comparison to that under CT.  
268 Reichert et al. (2009) reported that increase in BD is not necessarily critical to crop  
269 development because of increase in soil water storage within a specific range of BD. Increase  
270 in MI under NT plus the natural and strong structure inherent in soils of the tropics may  
271 accentuate soil water retention during periods of the year with low precipitation (Van den  
272 Berg et al., 1997).

273 Soil under CT had the highest range of variation (difference between maximum and  
274 minimum values) in SOC content, SOC stock, WSA, GMD, BD and TS, and the highest CV  
275 for SOC content, WSA, GMD, BD, and TS (Tables 1 and 2). Lower variability in soil  
276 attributes under NT and NF, compared to CT may be attributed to homogeneous distribution  
277 of plant residues (NT) or litterfall (NF) on soil surface, as well as by low soil disturbance  
278 which are conducive to development of soil structure in the soil surface.

279 The LLWR is represented by shaded area in Figure 3. Neither soil AP or PR under NF  
280 were restrictive to root growth for any values of BD, since the upper limit was FC and PWP  
281 as lower limit. Little or no disturbance of soil enhanced soil aggregation leading to a large  
282 distribution of pore size, which contributes to water retention. Thus, at the present study, there  
283 were no structural limitations to plant growth for the range of AWC (between FC and PWP).  
284 No restriction of AP and PR to root growth for any values of BD under NF, were also  
285 reported by Araújo et al. (2004).

286 For all land management systems (CT and NT: NTsc, NTcc, and NTss) the PR was the  
287 lower limit of LLWR. Soil under CT and NTsc the PR was positively correlated with BD,  
288 leading to a decrease in LLWR. On the other hand, negative correlation between PR and BD  
289 was observed under NTcc and NTss, and the LLWR expanded with increase in the BD due to  
290 the formation and/or presence of continuous biopores at the soil surface layer. Formation of  
291 biopores may reduce the adverse effects of a high PR and reduce its negative influence on  
292 root growth and crop yield. The PR value of 3.5 MPa may not be restrictive to root system  
293 growth in soil under NT because of the abundance of biopores (Ehlers et al., 1983; Tormena  
294 et al., 2007; Blainski et al., 2012). Calonego & Rosolen (2011) also observed that biopores  
295 created by vigorous root systems of cover crops in soil under NT improve LLWR more than  
296 chiseling, and that chiseling is not efficient in increasing the LLWR over a short time period.

297 The LLWR upper limit for all management systems was initially the FC. However, AP  
298 became the LLWR upper limit for BD values of 1.46 Mg m<sup>-3</sup> for CT, 1.40 Mg m<sup>-3</sup> for NTsc,  
299 1.42 Mg m<sup>-3</sup> for NTcc, and 1.41 Mg m<sup>-3</sup> for NTss. Under CT, only 7% of the BD values  
300 became AP as the limiting (upper limit) value for LLWR. In contrast, limiting value of  
301 aeration porosity of soil under NT were: 62 % for NTsc, 25 % for NTcc, and 50% for NTss.  
302 The AP was more limiting under NT than that under CT because of low soil disturbance  
303 (seedbed line) under NT which increased BD and reduced TP and MA. Substitution of FC by  
304 AP as the LLWR upper limit is observed in clayey soils because of a low soil MA (Calonego  
305 & Rosolem, 2011). The AP can restrict root growth by reducing oxygen diffusion rate in soil  
306 (Olibone et al., 2010). Substitution of FC by AP as the LLWR upper limit was also observed  
307 by Tormena et al. (2007), Calonego & Rosolem (2011), and Blainski et al. (2012).

308 The critical value of BD, when the LLWR approaches zero, were: 1.67 Mg m<sup>-3</sup> for NF,  
309 1.53 Mg m<sup>-3</sup> for CT, 1.53 Mg m<sup>-3</sup> for NTsc, 1.62 Mg m<sup>-3</sup> for NTcc, and 1.57 Mg m<sup>-3</sup> for NTss.  
310 The CT and NT system (NTsc, NTcc and NTss) as well as under NF did not show BD values  
311 higher than that considerate critical for root growth. Thus, it is justified to conclude that crop  
312 rotation under NT improve soil structural quality similar to that of a soil under NF. In  
313 contrast, Tormena et al. (2007) reported that crop succession (soybean-wheat) under NT  
314 showed low structural stability. Also, the authors observed that crop succession (soybean-  
315 wheat) and crop rotation (corn-wheat-soybean-oat-soybean-oat) under NT 18% of BD values  
316 higher than that considered critical for root growth (1.30 Mg m<sup>-3</sup>). However, large distribution

317 range of high BD values ( $> 1.15 \text{ Mg m}^{-3}$ ) associated to low LLWR, was observed under crop  
318 succession (soybean-wheat) when compared to crop rotation.

319

320

## 321 **CONCLUSIONS**

322

323 1. The hypothesis of this study was confirmed and supports the argument that  
324 deforestation decreases soil quality.

325 2. The hypothesis was also confirmed that the adoption of no-tillage system improves  
326 size aggregates and its stability.

327 In addition to the hypotheses, the data support the following conclusions:

328 1. Water stable aggregates and geometric mean diameter of soil aggregates decrease  
329 with increasing intensity of soil disturbance.

330 2. Soil under no-tillage system had higher soil bulk density but the values is lower than  
331 the critical soil bulk density.

332 3. Soil under native forest has the highest least limiting water range.

333 4. Soil penetration resistance and aeration porosity reduce the least limiting water  
334 range under no-tillage system and conventional tillage.

335 5. Corn/corn and soybean/soybean, as summer crop under no-tillage increased the  
336 least limiting water range.

337

338

## 339 **ACKNOWLEDGMENTS**

340

341 We are grateful to CAPES Foundation, Ministry of Education of Brazil, for  
342 scholarship for the first author (Process 8745/11-0), to São Paulo State University – UNESP  
343 and The Ohio State University by exchange to first author, and to Felipe Biondi, Priscila  
344 Volante e Tiago Fieno for their help during soil analisys.

345

346

347

348

349 **LITERATURE CITED**

350

351 ALBUQUERQUE, J.A., REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. &  
352 FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo de solo: efeito sobre a  
353 forma de estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:115-119, 1995.

354 ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo  
355 Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. R. Bras. Ci. Solo, 28:337-345, 2004.

356 BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J.  
357 Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. Soil Till. Res.,  
358 86:237-245, 2006.

359 BHATTACHARYYA R.; TUTI, M.D.; KUNDU, S.; BISHT, J.K. & BHATT, J.C.  
360 Conservation Tillage Impacts on Soil Aggregation and Carbon Pools in a Sandy Clay  
361 Loam Soil of the Indian Himalayas. Soil Sci. Soc. Am. J., 76:617-627, 2012.

362 BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L. & NANNI, M.R. Qualidade física  
363 de um latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. R. Bras. Ci.  
364 Solo, 36:79-87, 2012.

365 CALONEGO J.C. & ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations  
366 and chiseling. R. Bras. Ci. Solo, 35:759-771, 2011.

367 CALONEGO J.C.; SANTOS, C.H.; TIRITAN, C.S.; CUNHA JÚNIOR, J.R. Estoques de  
368 carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. R.  
369 Caatinga, 25:128-135, 2012.

370 CARTER, M.R.; ANGERS, D.A. & TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical  
371 condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid  
372 climate. Soil Sci., 164:101-110, 1999.

373 CÁSSARO F.A.M.; BORKOWSKI, A.K.; PIRES, L.F.; ROSA, J.A. & SAAB, S.C.  
374 Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage  
375 management practices using pore size distribution analysis. Soil Till. Res., 111:175-  
376 179, 2011.

377 CAVALIERI K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R. &  
378 HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties  
379 in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. Soil Till. Res., 103:158-164, 2009.

- 380 CENTURION, J.F. 1998. Caracterização e classificação dos solos da Faculdade de Ciências  
381 Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista,  
382 1998. 84p. (Tese de Livre Docência).
- 383 DANE, J.H. & HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H. & TOPP, C.  
384 Methods of soil analysis: Physical methods. Madison, Soil Sci. Soc. Am., 2002. p.688-  
385 690.
- 386 DON, A.; SCHUMACHER, J. & FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil  
387 organic carbon stocks – a meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, 17:1658-1670, 2011.
- 388 DUNGAIT, J.A.J.; HOPKINS, D.W.; GREGORY, A.S. & WHITMORE, A.P. Soil organic  
389 matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Glob. Change Biol.*,  
390 18:1781–1796, 2012.
- 391 EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth  
392 of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275, 1983.
- 393 ELLERT B.H. & BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils  
394 under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.*, 75:529–538, 1995.
- 395 FAGERIA, N.K. Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping  
396 Systems. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.*, 43:2063-2113, 2012.
- 397 FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; OLIVEIRA, S.O.  
398 & ALMEIDA, B.G. Improvement of a testing apparatus for dynamometry: procedures  
399 for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile strength of soil  
400 aggregates. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:373-387, 2011.
- 401 FLINT, L.E. & FLINT, A.L. Porosity. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C. Methods of soil  
402 analysis: physical methods. Part4. Madison, Soil Sci. Soc. Am., 2002. p.241-253.
- 403 FUENTES M.; GOVAERTS, B.; DE LEÓN, F.; HIDALGO, C.; SAYRE, K.D.;  
404 ETCHEVERS, J. & DENDOOVEN, L. Fourteen years of applying zero and  
405 conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on  
406 physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.*, 30:228–237, 2009.
- 407 GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water  
408 suction on oxygen diffusion, redox potencial and elongation of corns roots. *Soil Sci.*  
409 *Soc. Am. J.*, 32:180-186, 1968.

- 410 GROSSMAN, R.B., & REINSCH, T.G. The solid phase, bulk density and linear extensibility.  
411 In: DANE, J.H. & TOPP, G.C. Methods of soil analysis: physical methods. Part 4.  
412 Soil Sci. Soc. Am. Madison. 2002. p.201-228.
- 413 HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L. & LEFKOWITZ, D.S. Changes in the landscape of Latin  
414 America between 1850 and 1985. II Net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. For. Ecol.  
415 Manag. 38:173-199, 1991.
- 416 IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and  
417 friability of oxisols. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:1656-1661, 2002.
- 418 JEMAI I.; AISSA, N.B.; GUIRAT, S.B.; BEN-HAMMOUDA, M. & GALLALI, T. Impact  
419 of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone,  
420 under a dry subhumid Tunisian climate. Soil Till. Res., 126:26-33, 2013.
- 421 KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE,  
422 A. Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods. Am. Soc. Agron.,  
423 Madison. 1986. p.635-660.
- 424 KLEBER, M.; NICO, P.S.; PLANTE, A.F.; FILLEY, T.; KRAMER, M.; SWANSTON, C. &  
425 SOLLINS, P. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically  
426 recalcitrant: implications for modeling concepts and temperature sensitivity. Glob.  
427 Change Biol., 17:1097-1107, 2011.
- 428 LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security.  
429 Science, 304:1623-1627, 2004.
- 430 LAL, R. No-tillage effects on soil properties under different crops in Western Nigeria. Soil  
431 Sci. Soc. Am. J., 40, 762-768, 1976.
- 432 LANZANOVA, M.E.; ELTZ, F.L.F., NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. &  
433 ROCHA, M.R. Atributos físicos de um argissolo em sistemas de culturas de longa  
434 duração sob semeadura direta. R. Bras. Ci. Solo, 34:1333-1342, 2010.
- 435 LEÃO, T.P. & SILVA, A.P. A simplified excel algorithm for estimating the least limiting  
436 water range of soils. Sci. Agric., 61:649-654, 2004.
- 437 MARTINS, M.R.; ANGERS, D.A. & CORÁ, J.E. Carbohydrate composition and water-  
438 stable aggregation of an Oxisol as affected by crop sequence under No-Till. Soil Sci.  
439 Soc. Am. J., 76:475-484, 2012.
- 440 MARTINS, M.R.; CORÁ, J.E.; JORGE, R.F. & MARCELO, A.V. Crop type influences soil  
441 aggregation and organic matter under no-tillage. Soil Till. Res. 104:22-29, 2009.

- 442 NIMMO, J.R. & PERKINS, K.S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H. &  
443 TOPP, G.C. *Methods of soil analysis: Physical methods*, Madison, Soil Sci. Soc. Am.  
444 2002. p.317-328.
- 445 OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A.P. & ROSOLEM, C.A. Least limiting water range  
446 and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manage.*, 26:485–  
447 493, 2010.
- 448 PERES, J.G.; SOUZA, C.F. & LAVORENTI, N.A. Avaliação dos efeitos da cobertura de  
449 palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. *Eng. Agric.*, 30:875-  
450 886, 2010.
- 451 REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- 452 REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HÅKANSSON, I.H.  
453 Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production  
454 in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242-254, 2009.
- 455 ROMANO, N.; HOPMANS, J.W. & DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H. & TOPP, C.  
456 *Methods of soil analysis: Physical Methods*, Madison, Soil Sci. Soc. Am. 2002. p.692-  
457 698.
- 458 ROSCOE, R. & BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a  
459 Cerrado Oxisol. *Soil Till. Res.*, 70:107-119, 2003.
- 460 SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lesser limit of soil water  
461 availability. *Agron. J.*, 88:644-651, 1996.
- 462 SEBEN JUNIOR, G.F.; KUHNEN, F., SYLVESTRE, T.B.; ALMEIDA, C.X. &  
463 CENTURION, J.F. Aggregation of an Ultissol under guava orchard after application  
464 of organic guava-processing industry residues. *R. Bras. Frut.*, 33:1275-1282, 2011.
- 465 SILVA, A.P. & KAY, B.D. Linking process capability analysis and least limiting water range  
466 for assessing soil physical quality. *Soil Till. Res.*, 79:167–174, 2004.
- 467 SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range.  
468 *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- 469 SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M. & ALBRECHT, A. Soil organic  
470 matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage.  
471 *Agronomie*, 22:755–775, 2002.
- 472 SMITH, P., MARTINO, D., CAI, Z., GWARY, D., JANZEN, H., KUMAR, P., MCCARL,  
473 B., OGLE, STEPHEN, O'MARA, F., RICE, CO., SCHOLLES, B., SIROTKENKO, O.,

- 474 HOWDEN, M., MCALLISTER, T., PAN, G., ROMANENKOV, V., SCHNEIDER,  
475 U., TOWPRAYOON, S., WATTENBACH, M. & SMITH, J., Greenhouse gas  
476 mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B:*  
477 *Biological Sciences*, 363:789-813, 2008.
- 478 SO, H.B.; GRABSKI, A.; DESBOROUGH, P. The impact of 14 years of conventional and  
479 no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton  
480 NSW, Australia. *Soil Till. Res.*, 104:180-184, 2009.
- 481 SOIL SURVEY STAFF . *Keys to Soil Taxonomy*. 11th ed. Washington, NRCS. 2010.
- 482 TIVET, F.; SÁ, J.C.M.; BORSZOWSKEL, P.R.; LETOURMY, P.; BRIEDIS, C.;  
483 FERREIRA, A.O.; SANTOS, J.B. & INAGAKI, T.M. Soil carbon inventory by wet  
484 oxidation and dry combustion methods: Effects of land use, soil texture gradients, and  
485 sampling depth on the linear model of C-Equivalent correction factor. *Soil Sci. Soc.*  
486 *Am. J.*, 76:1048-1059, 2012.
- 487 TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto  
488 influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309,  
489 1998.
- 490 TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do  
491 intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de  
492 plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- 493 TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de  
494 um latossolo sob diferentes sistemas de uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:33-42, 2008.
- 495 TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S. & GONÇALVES, A.C.A. Densidade,  
496 porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de  
497 preparo do solo. *Sci. Agrícola*, 59:795-801, 2002.
- 498 Van den BERG, M.; KLAMT, E.; Van REUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfers  
499 functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and  
500 related soils. *Geoderma*, 78:161-180, 1997.
- 501 VEZZANI F.M. & MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo  
502 submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:213-223,  
503 2011.

- 504 VIANA, E.T.; BATISTA, M.A.; TORMENA, C.A.; COSTA, A.C.S. & INOUE, T.T.  
505 Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas  
506 de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 35:2105-2114, 2011.
- 507 WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of  
508 management and organic carbon content. Eur. J. Soil Sci., 49:73-84, 1998.
- 509 WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I.C.; OLIVEIRA, R.C.; BABATA, M.M.; BORGES,  
510 E.N. Density, porosity and soil aggregation in areas of cerrado conversion in pine  
511 forest, pasture and no-tillage. Biosci. J., 28:256-265, 2012.
- 512 WEST, T.O. & POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop  
513 rotation: a global data analysis. Soil Sc. Soc. Am. J., 66:1930-1946, 2002.
- 514 YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination  
515 of organic carbon in soil. Soil Sci. Plant Anal., 19:1467-1476, 1988.
- 516 YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of physical nature of  
517 soil erosion losses. J. Am. Soc. Agron., 28:337-351, 1936.
- 518 ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.;  
519 FRANCHINI, J.C. & ALVES, B.J.R. Influence of no-tillage and frequency of a green  
520 manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C  
521 stocks. Field Crops Res., 132:185-195, 2012.

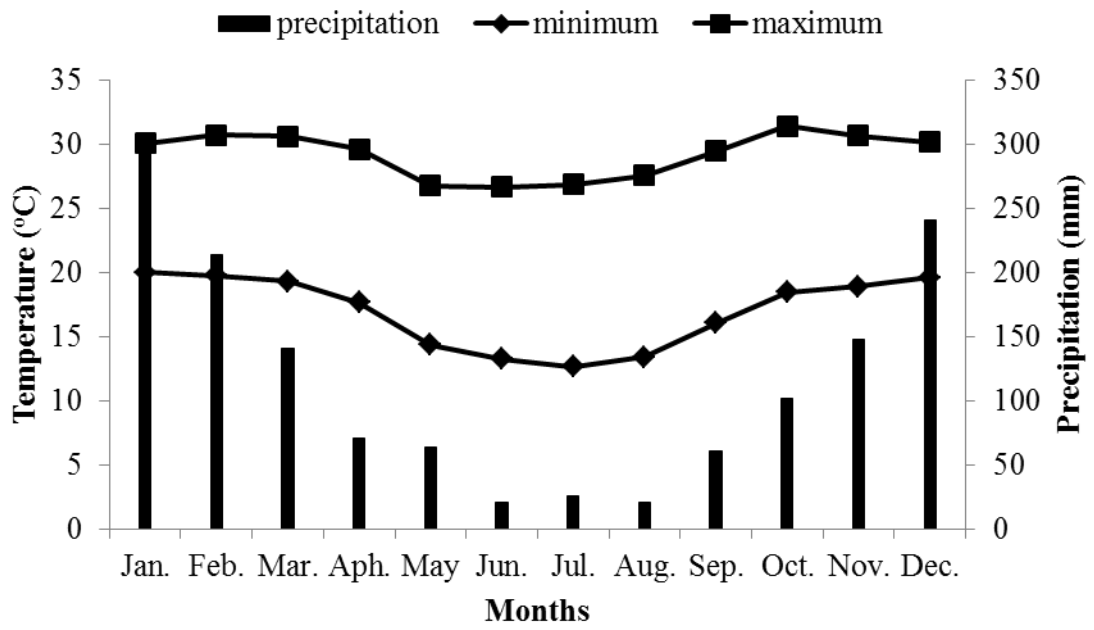


Figure 1. Monthly average for maximum and minimum temperatures and precipitation at experimental area (1971 – 2010).

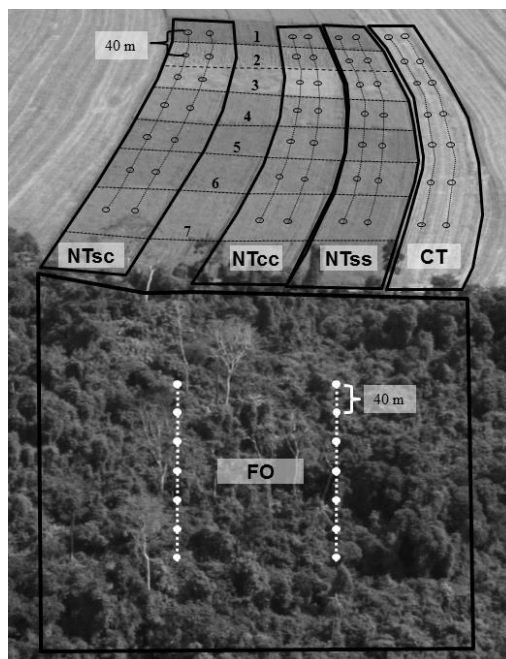


Figure 2. Aerial view showing the area of study under use systems and managements, as follow: No-till system cultivated with summer crops: soybean/corn (NTsc); corn/corn (NTcc); and soybean/soybean (NTss); conventional tillage system (CT); and native forest (NF). Within summer crops in no-till are presented seven winter crops: corn (1); sunflower (2); oilseed radish (3); pearl millet (4); pigeon pea (5); grain sorghum (6); and sunn hemp (7). Within each treatment the dotted line represents two transects with 14 points where soil samples were collected, distant one another 40 m.

524 Table 1. Soil organic carbon content, soil organic carbon stock, water stable aggregate,  
 525 geometric mean diameter, and soil bulk density evaluated in an Oxisol under native  
 526 forest (NF), under no-till with: soybean/corn (NTsc), corn/corn (NTcc), and  
 527 soybean/soybean (NTss), and conventional tillage system (CT).

| Systems  | Minimum | Maximum | Average | Standard Deviation | CV (%) |
|--|---------|---------|---------|--------------------|--------|
| <b>Soil organic carbon content (g kg<sup>-1</sup>)</b> |         |         |         |                    |        |
| NF   | 29.58   | 30.74   | 30.24 a | 0.40               | 1.3    |
| NTsc   | 11.56   | 13.19   | 12.20 b | 0.54               | 4.4    |
| NTcc   | 11.90   | 12.71   | 12.22 b | 0.25               | 2.0    |
| NTss   | 11.48   | 12.89   | 12.19 b | 0.55               | 4.5    |
| CT   | 10.44   | 13.34   | 11.80 b | 1.22               | 10.3   |
|  | F test  |         | 10.00*  |                    |        |
|  | CV      |         | 4.3     |                    |        |
| <b>Soil organic carbon stock (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>  |         |         |         |                    |        |
| NF   | 24.92   | 31.37   | 28.16 a | 2.56               | 9.1    |
| NTsc   | 10.64   | 12.13   | 11.23 b | 0.50               | 4.4    |
| NTcc   | 10.94   | 11.69   | 11.25 b | 0.23               | 2.0    |
| NTss   | 10.56   | 11.86   | 11.22 b | 0.50               | 4.5    |
| CT   | 9.29    | 13.87   | 10.98 b | 1.46               | 13.3   |
|  | F test  |         | 21.91*  |                    |        |
|  | CV      |         | 9.3     |                    |        |
| <b>Water stable aggregates (%)</b>                     |         |         |         |                    |        |
| NF   | 97.93   | 99.35   | 98.75 a | 0.52               | 0.5    |
| NTsc   | 68.65   | 78.09   | 72.69 b | 3.41               | 4.7    |
| NTcc   | 68.64   | 80.15   | 73.89 b | 4.33               | 5.9    |
| NTss   | 67.53   | 76.80   | 72.47 b | 4.22               | 5.8    |
| CT   | 49.30   | 62.27   | 56.84 c | 4.22               | 7.4    |
|  | F test  |         | 11.97*  |                    |        |
|  | CV      |         | 4.9     |                    |        |
| <b>Geometric mean diameter (mm)</b>                    |         |         |         |                    |        |
| NF   | 3.90    | 4.69    | 4.66 a  | 0.02               | 0.4    |
| NTsc   | 2.84    | 3.57    | 3.22 b  | 0.28               | 8.7    |
| NTcc   | 2.92    | 3.48    | 3.17 b  | 0.17               | 5.3    |
| NTss   | 2.65    | 3.31    | 3.05 b  | 0.25               | 8.1    |
| CT   | 2.19    | 3.21    | 2.76 c  | 0.36               | 13.0   |
|  |         |         | 22.56*  |                    |        |
|  |         |         | 14.6    |                    |        |
| <b>Soil bulk density (Mg m<sup>-3</sup>)</b>           |         |         |         |                    |        |
| NF   | 0.83    | 1.04    | 0.93 c  | 0.09               | 9.5    |
| NTsc   | 1.40    | 1.51    | 1.45 a  | 0.04               | 2.5    |
| NTcc   | 1.40    | 1.53    | 1.46 a  | 0.04               | 2.9    |
| NTss   | 1.40    | 1.48    | 1.45 a  | 0.02               | 1.6    |
| CT   | 1.13    | 1.48    | 1.30 b  | 0.13               | 10.0   |
|  | F test  |         | 62.17*  |                    |        |
|  | CV      |         | 5.7     |                    |        |

Values followed by lowercase letters, on the same column are significantly different by Tukey test ( $p < 0.01$ ). \*  $p < 0.01$ .

528

529

530 Table 2. Tensile strength, total porosity, microporosity and macroporosity evaluated in an  
 531 Oxisol under native forest (NF), under no-till with: soybean/corn (NTsc), corn/corn  
 532 (NTcc), and soybean/soybean (NTss), and conventional tillage system (CT).

| Systems                       | Minimum | Maximum | Average  | Standard Deviation | CV (%) |
|-------------------------------|---------|---------|----------|--------------------|--------|
| <b>Tensile strength (kPa)</b> |         |         |          |                    |        |
| NF                            | 14.91   | 35.01   | 24.59 c  | 6.31               | 25.6   |
| NTsc                          | 38.19   | 56.84   | 46.71 a  | 6.30               | 13.5   |
| NTcc                          | 35.27   | 48.18   | 41.50 ab | 4.33               | 10.4   |
| NTss                          | 32.92   | 44.93   | 38.56 ab | 4.34               | 11.2   |
| CT                            | 19.12   | 57.54   | 34.01 bc | 11.56              | 34.0   |
|                               |         |         | 9.78*    |                    |        |
|                               |         |         | 19.1     |                    |        |
| <b>Total porosity (%)</b>     |         |         |          |                    |        |
| NF                            | 66.48   | 68.96   | 67.53 a  | 0.89               | 1.3    |
| NTsc                          | 42.46   | 51.70   | 47.21 c  | 2.73               | 5.8    |
| NTcc                          | 42.72   | 51.63   | 45.70 c  | 3.15               | 6.9    |
| NTss                          | 45.85   | 50.16   | 48.03 c  | 1.53               | 3.2    |
| CT                            | 52.09   | 55.53   | 53.59 b  | 1.29               | 2.4    |
|                               | F test  |         | 12.66*   |                    |        |
|                               | CV      |         | 4.0      |                    |        |
| <b>Microporosity (%)</b>      |         |         |          |                    |        |
| NF                            | 37.26   | 39.44   | 38.73 a  | 0.75               | 1.9    |
| NTsc                          | 35.09   | 38.97   | 36.88 a  | 1.29               | 3.5    |
| NTcc                          | 36.42   | 41.01   | 38.62 a  | 1.83               | 4.7    |
| NTss                          | 36.02   | 44.07   | 39.23 a  | 2.55               | 6.5    |
| CT                            | 32.35   | 35.59   | 34.05 b  | 1.04               | 3.0    |
|                               | F test  |         | 12.00*   |                    |        |
|                               | CV      |         | 4.3      |                    |        |
| <b>Macroporosity (%)</b>      |         |         |          |                    |        |
| NF                            | 27.35   | 30.30   | 28.81 a  | 1.15               | 4.0    |
| NTsc                          | 6.56    | 13.88   | 10.33 c  | 2.39               | 23.2   |
| NTcc                          | 3.86    | 11.56   | 7.07 c   | 3.25               | 45.9   |
| NTss                          | 5.15    | 12.24   | 8.80 c   | 2.65               | 30.1   |
| CT                            | 16.5    | 21.27   | 19.54 b  | 1.78               | 9.1    |
|                               | F test  |         | 10.53*   |                    |        |
|                               | CV      |         | 15.8     |                    |        |

Values followed by lowercase letters, on the same column are significantly different by Tukey test ( $p < 0.01$ ). \*  $p < 0.01$ , <sup>ns</sup> not significant.

533

534

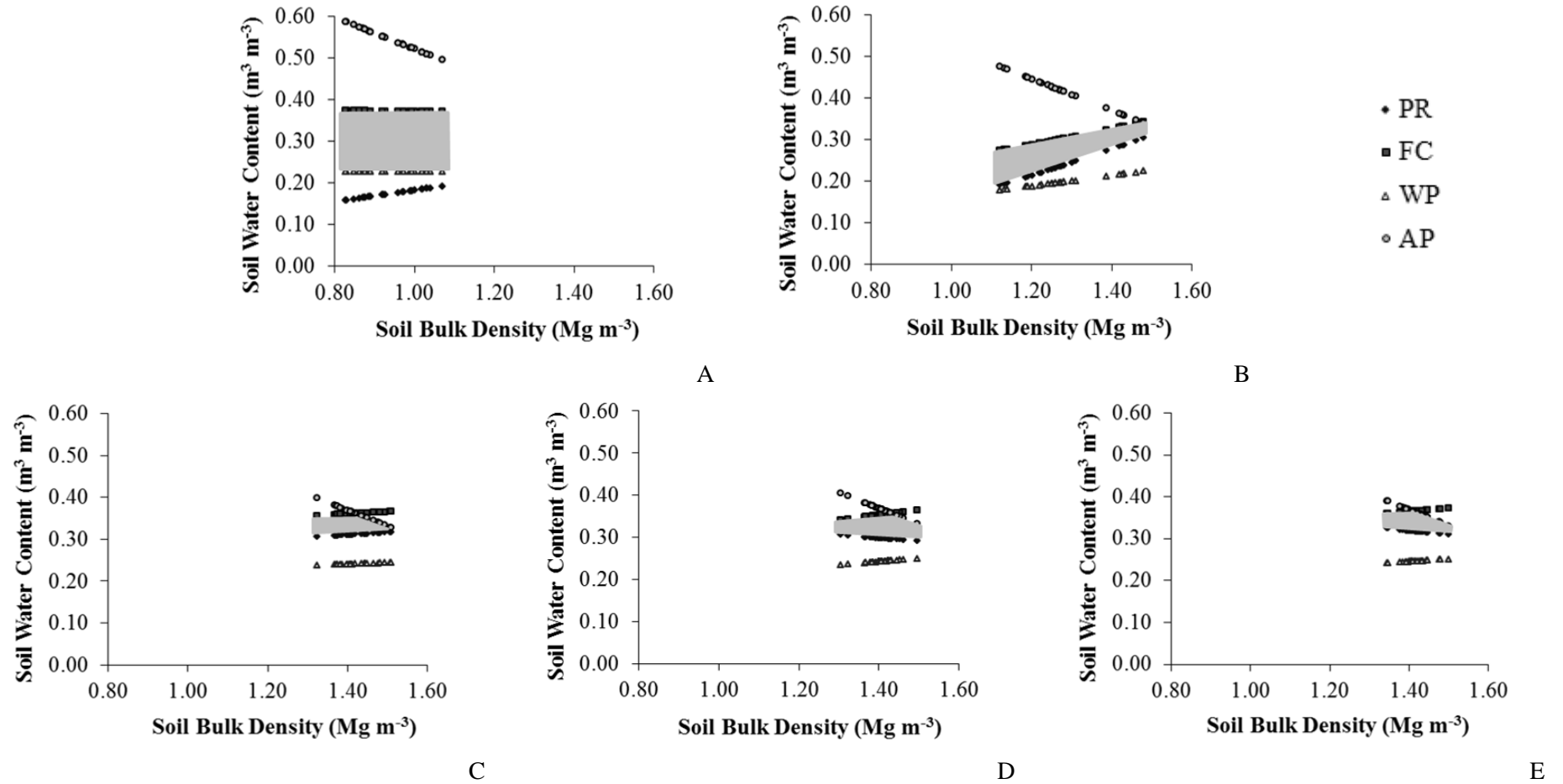


Figure 3. Soil volumetric water content affected by soil bulk density, critical levels of penetration resistance (PR = 3.5 MPa), field capacity (FC = 0.01 MPa), permanent wilting point (WP = 1.5 MPa), aeration porosity (AP = 10%) in samples from 0 to 10 cm of an Oxisol under native forest (A), conventional tillage system (B), and no-till with: soybean/corn (C), corn/corn (D), and soybean/soybean (E).

## 1 **Capítulo 3 - CROPPING SYSTEMS IN NO-TILL FARMING ON SOIL QUALITY OF** 2 **A BRAZILIAN OXISOL** <sup>1</sup>

3 Getulio de Freitas Seben Junior<sup>2</sup>, José Eduardo Corá<sup>3</sup>, and Rattan Lal<sup>4</sup>

### 5 **SUMMARY**

6 No-till (NT) system for complex cropping sequences may improve structural quality  
 7 and carbon (C) sequestration in soils of the tropics. Thus, the specific objective was to  
 8 evaluate the effects of cropping sequences in NT, after eight years, on physical properties and  
 9 C sequestration of an Oxisol in Jaboticabal, SP, Brazil (21°14' S, 48°17' W, 550 m a.s.l.). A  
 10 randomized split-block design with three replications was used. The treatments were  
 11 combinations of three summer cropping sequences: corn/corn (*Zea mays* L.) (CC);  
 12 soybean/soybean (*Glycine max* L. Merryll) (SS); and soybean-corn (SC), and seven winter  
 13 crops: corn, sunflower (*Helianthus annuus* L.), oilseed radish (*Raphanus sativus* L.), pearl  
 14 millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), grain  
 15 sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), and sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.). Soil under  
 16 SC and CC had higher mean weight diameter (3.63 and 3.55 mm, respectively) and geometric  
 17 mean diameter (3.55 and 2.92 mm), than that under SS (3.18 and 2.46 mm). The CC resulted  
 18 in the highest increase in soil organic C (SOC) content (17.07 g kg<sup>-1</sup>), SOC stock  
 19 (15.70 Mg ha<sup>-1</sup>) and rate of C sequestration (0.70 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) among summer crops. Among  
 20 winter crops, soil under pigeon pea had the highest total porosity (0.50 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), and that under  
 21 sunn hemp had the highest water stable aggregate (WSA) (93.74 %). Furthermore, sunn hemp  
 22 did not differ from that under grain sorghum and also contained the highest content of SOC  
 23 (16.82 g kg<sup>-1</sup>) and had also the highest rate of C sequestration (0.67 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>). The  
 24 penetration resistance (PR) was a lower limit of least limiting water range (LLWR), and the  
 25 upper limit was air-filled porosity for bulk density ( $\ell_b$ ) > 1.39 Mg m<sup>-3</sup> for all cropping  
 26 sequences. Within SC, soil under corn and pigeon pea increased LLWR by formation of  
 27 biopores because PR decreased with increase in  $\ell_b$ .

28  
 29 **Index-terms:** Crop rotation, winter crop, aggregates, least limiting water range, bulk density.

<sup>1</sup> Extracted from Doctoral Thesis of the first author. Submitted at July, 04<sup>th</sup> of 2013.

<sup>2</sup> Phd Student in Agronomy by São Paulo State University, Jaboticabal, SP, Brazil. Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n. Jaboticabal, SP, 14884-900, Brasil. E-mail: getulioseben@gmail.com

<sup>3</sup> Adjunct Professor at São Paulo State University, Jaboticabal, SP, Brazil. E-mail: cora@fcav.unesp.br

<sup>4</sup> Emeritus Professor by The Ohio State University, School of Environment and Natural Resources, 2021 Coffey Rd., Columbus, OH 43210, USA. E-mail: lal.1@osu.edu

30 **RESUMO: SEQUÊNCIAS DE CULTURAS EM SISTEMA DE SEMEADURA**  
31 **DIRETA SOBRE A QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO**

32

33 O cultivo intensivo de sequências de culturas em sistema de semeadura direta (SSD)  
34 proporciona o incremento de carbono (C) e a melhoria da qualidade estrutural do solo.  
35 Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de sequências de culturas em SSD  
36 sobre o acúmulo de C e as propriedades físicas do solo em um Latossolo em Jaboticabal, SP,  
37 Brazil (21°14' S, 48°17' W, 550 m de altitude). O delineamento utilizado foi em faixas, com  
38 três repetições. Os tratamentos foram constituídos da combinação de três culturas de verão:  
39 milho/milho (*Zea mays* L.) (MM); soja/soja (*Glycine max* L. Merryll) (SS); e soja/milho  
40 (SM); e, sete culturas de inverno: milho, girasol (*Helianthus annuus* L.), nabo forrageiro  
41 (*Raphanus sativus* L.), milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), feijão guandu (*Cajanus*  
42 *cajan* (L.) Millsp), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), e crotalária (*Crotalaria juncea* L.).  
43 O solo sob SM e MM apresentou o maior diâmetro médio ponderado (3,63 e 3,55 mm) e  
44 diâmetro médio geométrico (3,55 e 2,92 mm), em comparação ao solo sob SS (3,18 e  
45 2,46 mm). O MM proporcionou o maior conteúdo de C (17,07 g kg<sup>-1</sup>), maior estoque de C  
46 (15,70 Mg ha<sup>-1</sup>) e a maior taxa de sequestro de C (0,70 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) entre as culturas de  
47 verão. Entre as culturas de inverno, o feijão guandu proporcionou a maior porosidade total  
48 (0,50 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), enquanto que, a crotalária proporcionou o maior índice de estabilidade de  
49 agregados (93,74 %), o maior conteúdo de C (16,82 g kg<sup>-1</sup>) e a maior taxa de sequestro de C  
50 (0,67 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). A resistência do solo à penetração representou o limite inferior do  
51 interval hídrico ótimo (IHO), enquanto que, o limite superior foi representado pela porosidade  
52 de aeração, para valores de densidade do solo maiores que 1,39 Mg m<sup>-3</sup>, determinados em  
53 todas as sequências de culturas. O milho e o feijão guandu cultivados no SM proporcionaram  
54 o aumento do IHO pela formação de bioporos, pois os valores determinados da resistência do  
55 solo à penetração diminuíram com o incremento da densidade do solo.

56

57 **Termos de indexação:** Rotação de culturas, culturas de inverno, agregados, intervalo hídrico  
58 ótimo, densidade do solo

59

60

61

## 62 INTRODUCTION

63

64 Oxisols are highly weathered and have a strong microstructure due to presence of Fe-  
65 and Al-oxides and hydroxides, with limited range of action (Six et al., 2002). Yet, soil  
66 structure is prone to degradation due to intense soil disturbance, erosion process by rainfall,  
67 high temperature and low input of biomass carbon. A no-till system (NT) is widely  
68 recommended to minimize these adverse effects and improve soil quality. The NT improves  
69 structural properties and can enhance C sequestration in soils of the tropical regions at a rate  
70 of  $0.35 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  in 0 to 20 cm depth (Bayer et al., 2006), and  $0.43 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  in 0 to  
71 10 cm depth (Six et al., 2002), contributing towards mitigation of global warming (Bayer et  
72 al., 2006). However, the intensity of NT effects on soil quality depends on specific cropping  
73 sequences.

74 However, establishment of cropping sequence in tropical regions, especially of  
75 winter crops, is limited by a relatively dry season from April to September. Thus, winter crops  
76 must have a deep and vigorous root system (Marcelo et al., 2009), and exhibit fast  
77 establishment to produce the maximum biomass by late autumn after which the rains cease  
78 (Bayer et al., 2006).

79 The magnitude of above-ground is critical to reducing slaking and erosion of soil  
80 surface. In comparison, root system is important to increasing soil aggregation and long-term  
81 C sequestration in soil (Six et al., 2002). In an Oxisol under NT cropping sequences involving  
82 pearl millet and grain sorghum (Poaceae species) that aggregation increased but had lower  
83 quantity of roots compared to oilseed radish (legume) (Martins et al., 2012). Martins and  
84 colleagues concluded that aggregation is indirectly affected by input of plant pentoses trough  
85 input of above-ground biomass and roots. In tropical regions, poáceas enhance aggregation  
86 compared to legume because of a favorable quantity and distribution of the roots in soil,  
87 periodic renewal, uniform distribution of exudates, and lateral compaction during  
88 development and water absorption (Silva & Mielniczuk, 1997; Six et al., 2002; Martins et al.,  
89 2009; Martins et al., 2012).

90 Establishments of winter crops increase biopores in compacted layers by deep root  
91 systems (Williams & Weil, 2004) and reduce critical soil bulk density ( $\ell_b$ ) in soil under NT.  
92 Such favorable effects can ever be observed during the first years because of the absence of  
93 soil disturbance and reduction in machinery traffic (Tormena et al., 1998). Decrease in critical

94  $\ell_b$  by root growth depend on the soil texture, mineralogy, particle shape, and soil organic  
95 matter (SOM) content which influence water, air and penetration resistance (Reichert et al.,  
96 2009).

97         The structural quality can be assessed by determining a balance in fluid (air vs. water)  
98 transmission, water storage, nutrients in soil solution, and air-filled porosity (Topp et al.,  
99 1997). A favorable level of these attributes is important to improving crop growth, while  
100 reducing risks of accelerated erosion and compaction limits root growth (Reynolds et al.,  
101 2002). The range of soil properties which improve plant growth depends on strong interaction  
102 among soil penetration resistance (SPR), air-filled porosity (AFP), and available water  
103 capacity (AWC), which is obtained from the difference between field capacity and permanent  
104 wilting point (PWP) (Tormena et al., 2007). The so called least limiting water range (LLWR)  
105 (Letey, 1985; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998), equivalent to a range of water content  
106 in soil which plants may grow without being constrained by soil properties which restrict  
107 physiological processes (Reynolds et al., 2002). Thus, LLWR is an important indicator of soil  
108 structural quality in relation to crop yield (Silva et al., 1994).

109         Therefore, is important to evaluate the effects of structural properties on plants  
110 within specific cropping sequences, and to understand which and how soil attributes can be  
111 affected by specific crops. Thus, the present study was conducted to test the hypothesis that  
112 cropping sequences affects soil structural properties. The specific objective of the study was  
113 to evaluate the effects of cropping sequences under NT on soil structure and SOC  
114 sequestration.

115

116

## 117 **MATERIAL AND METHODS**

118

119         The field experiment was initiated in 2002 at Jaboticabal, SP, Brazil (21°15'22'' S  
120 48°18'58'' W, 550 m above sea level). The tropical climate at experimental site is classified  
121 as Aw according to the Köppen classification (dry and warm winter with temperature greater  
122 than 18 °C), with mean annual temperature of 22 °C, relative humidity of 70 %, and a mean  
123 annual rainfall of 1,425 mm. The rainfall peaks between October and March with a relatively  
124 dry season from April to September. Details of site characteristics are shown at Figure 1. The  
125 soil of the experimental site is a Rhodic Eutrudox (Oxisol), according to USDA Soil

126 Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010). Particle size distribution of 0-10 cm layer comprises of  
127 556 g kg<sup>-1</sup> of clay, 63 g kg<sup>-1</sup> of silt and 381 g kg<sup>-1</sup> of sand.

128 The experiment laid out according to a split-block design with three replications  
129 (blocks). Each experimental block comprised of 21 plots, which consisted of three summer  
130 cropping sequences combined with seven winter crops. Each plot was 40 m long and 15 m  
131 wide. The summer cropping sequences included the following: corn/corn (*Zea mays* L.);  
132 soybean/soybean (*Glycine max* L. Merrill), and soybean/corn, both intercropped every other  
133 year. Winter crops consisted of corn, sunflower (*Helianthus annuus* L.), oilseed radish  
134 (*Raphanus sativus* L.), pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), pigeon pea  
135 (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and sunn hemp  
136 (*Crotalaria juncea* L.), sown in February/March. Same winter crop was grown in the same  
137 plot during each growing season.

138 Soil samples were obtained in October 2010 during the eighth year of the experiment  
139 (2009/2010), after harvesting of the winter crops and before sowing of the summer crops. Soil  
140 samples were obtained at random within each plot using a straight spade, and a total of 20  
141 subsamples were obtained from 0 - 10 cm depth and were composited. In addition, 28  
142 undisturbed core samples were also obtained from each plot. Soil samples were placed within  
143 plastic bags to preserve structure and the moisture content during transport to laboratory.

144 The composite samples were broken manually at the field moisture content and  
145 divided into three portions. The first portion was used to sieve soil aggregates from 6.3 to 4.0  
146 mm, the second was used to sieve aggregates from 2.0 to 1.0 mm and the third was air dried  
147 for 48 h and grounded to pass through a 2.00 mm sieve.

148 The air dry soil aggregates of 4.0 to 6.3 mm size fraction were used to determine the  
149 mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) (Nimmo & Perkins,  
150 2002). Three replicates of aggregates of 40 g and one of 10 g were weighed. The 10 g sample  
151 was oven dried at 105 °C for 24 h to determine the soil moisture content. The other three  
152 samples were used for wet sieving by using a nest of five sieves: 4.00, 2.00, 1.00, 0.50 and  
153 0.25 mm. After the aggregates on the top sieve (4.00 mm) were wetted under capillarity, the  
154 nest of sieve was oscillated under water by using Yoder device (Yoder, 1936). Samples were  
155 subjected to wet sieving for 15 min at 31 cycles min<sup>-1</sup> and with amplitude of 35 mm.

156 Soil aggregates of 1.0 - 2.0 mm diameter were used to determine the water stable  
157 aggregates (WSA) (Yoder, 1936). Four replicates of 10 g of soil aggregates from 1.0 - 2.0 mm

158 were weighed and one of the four was used to determine soil moisture content by oven drying  
159 at 105 °C for 24 h. The other three replicates were used to determine WSA by using a sieve of  
160 0.25 mm mesh size. After the aggregates were wetted by capillarity, the sieve was oscillated  
161 under water for 3 min, at 35 cycles min<sup>-1</sup> and with an oscillation amplitude of 13 mm (Yoder,  
162 1936).

163 In both methodologies of wet sieving, soil retained on each sieve after oscillation  
164 under water was transferred to a weighed aluminum capsules and oven dried at 105 °C for 24  
165 h. Aggregates retained on each sieve were corrected for coarse and fine sand fractions  
166 (Kemper & Rosenau, 1986). To quantify the sand fraction, the oven-dried soil in the  
167 aluminum capsules was dispersed by adding 100 mL of 0.1 mol L<sup>-1</sup> NaOH and shaking at 60  
168 cycles min<sup>-1</sup> for 16 h. The suspension was passed through the same nest of sieves that retained  
169 aggregates during the wet sieving procedure (0.5 and 0.25 mm). The sand fraction retained on  
170 the sieves were collected into the corresponding aluminum capsules, placed in an oven at  
171 105°C for 24 h, and weighed. Using the data of the weight of the aggregates retained in each  
172 sieve, moisture content and sand fraction were computed MWD, GMD and WSA (Kemper &  
173 Rosenau, 1986).

174 One g of the ground sample (2.00 mm) was weighted to determine the soil organic  
175 carbon (SOC) content (Yeomans & Bremner, 1988). The SOC stock was calculated on  
176 equivalent mass basis (Ellert & Bettany, 1995). The SOC content under a native forest (30.16  
177 g kg<sup>-1</sup>), adjacent to study site, was used as a baseline to assess the impact of cropping  
178 sequences. Considering the SOC content of 19.0 g dm<sup>-3</sup> in soil prior to implementation of this  
179 experiment in 2002 (Corá, 2006), the rate of SOC sequestration was computed for the  
180 cropping sequences treatments.

181 Yield of crop residue was evaluated at two different times. The first evaluation  
182 involved only the quantification of above-ground biomass and it occurred when the winter  
183 cover crops (oilseed radish, pearl millet, pigeon pea and sunn hemp) were at the full bloom  
184 and when winter grain crops (corn, sunflower and grain sorghum) were at the harvest stage.  
185 The above ground biomass was assessed by harvesting 1 – m long row at three randomly  
186 selected locations in each plot, and the harvest was composited. The second evaluation was  
187 done to quantify the winter crops residue left on soil surface after they were cropped (cover  
188 crops) or harvested (rain crops). All remaining residues on soil surface, contained within a  
189 quadrat of 0.25 m<sup>2</sup> were collected at five randomly locations within each plot, the harvest was

190 composed and weighed (Stott et al., 1990). For both methodologies, a sub-sample was oven-  
 191 dried (65°C) to determine the dry matter.

192 The least limiting water range (LLWR) was determined following the method of  
 193 Silva et al. (1994). Critical values for plant growth were obtained from the literature, i.e., field  
 194 capacity at -0.01 MPa (Reichardt, 1988), PWP at -1.5 MPa (Savage et al., 1996), AFP at 10%  
 195 (Grable & Siemer, 1968), and SPR at 3.5 MPa, considering bioporosity in soil under NT  
 196 system (Ehlers et al., 1983; Tormena et al., 2007; Blainski et al., 2012).

197 The LLWR was determined as the average of three replications for each matric  
 198 potential. Thus, seven undisturbed soil cores were collected from each plot (6 cores with 5 cm  
 199 height x 5 cm diameter and 1 core with 2.5 cm height x 5.0 cm diameter). These cores were  
 200 separated into seven groups with 63 cores and were wetted by capillarity. Each group was  
 201 subjected to water suctions of -0.006 and -0.01 MPa on a Tension Table (Romano et al.,  
 202 2002), and 0.033, 0.06, 0.1, 0.3 and 1.5 MPa on a series of Pressure Plate Extractors (Dane &  
 203 Hopmans, 2002). Group with the smallest cores (2.5 x 5.0 cm) were used to measure water  
 204 retention at the suction of 15000 hPa because of the long time to reach equilibrium. The  
 205 penetration resistance was evaluated in each core at every matric potential, using a  
 206 penetrometer, equipped with a linear actuator and load cell of 20 kg, operated at constant  
 207 speed of 1.76 mm s<sup>-1</sup>, and coupled to a computer for data acquisition (Figueiredo et al., 2011).  
 208 The penetrometer cone had an angle of 30° and the base diameter of 3.91 mm. These data  
 209 were used to calculate the LLWR (Silva et al., 1994). The empirical parameters used to adjust  
 210 the equations to obtain the LLWR and the critical  $\ell_b$  were obtained using a simplified  
 211 algorithm developed in Excel<sup>®</sup> software by Leão & Silva (2004). Additionally, the total  
 212 porosity, micro and macroporosity were determined by the method proposed of Flint & Flint  
 213 (2002).

214 The water dispersed clay (WDC) was determined by the pipette method (Gee &  
 215 Bauder, 1986). Briefly, 10 g of dry soil (< 2.0 mm) was putted into a bottle containing  
 216 200 cm<sup>3</sup> of water and shaken for 16 h in a Wiegner rotary shaker at 60 cycles min<sup>-1</sup>. The clay  
 217 content was also obtained by the pipette method (Gee & Bauder, 1986) using 10 mL of NaOH  
 218 as dispersant solution. Flocculation degree (FD) was obtained

219

$$FD = \frac{\text{clay content} - \text{water dispersed clay}}{\text{clay content}}$$

220

221 The data were submitted to the analysis of variance (F-test) and, whenever the F-test  
222 was significant ( $P < 0.05$ ), the means were compared by Tukey test ( $\alpha < 0.05$ ).

223

224

## 225 **RESULTS AND DISCUSSION**

226

227 Higher amount of above-ground biomass of the winter crops was measured in the  
228 soybean/soybean and soybean/corn, as summer crop, when compared to those observed in the  
229 corn/corn (Table 1). Being a legume, N fixed by soybean may be used by the following winter  
230 crop to produce the above-ground biomass. In symbiosis with *Bradyrhizobium sp.* soybean  
231 may contribute 100 to 160 kg of N ha<sup>-1</sup> (Vest et al., 1973). In another experiment conducted at  
232 the same site, in 2007/2008 and 2008/2009 growing season, Marcelo et al. (2012) observed  
233 that the biomass of cereals such as pearl millet and grain sorghum increased by 56 and 69 %  
234 when grown after soybean than after corn/corn on summer. The high yield of biomass was  
235 attributed to high availability of soil N by biological fixation and the high potential of these  
236 cereals with an adequate supply of N. In a study to assess the N absorption capacity and its  
237 effect on biomass yield of corn in response to addition of sunn hemp and pearl millet residues  
238 in an Oxisol, Silva et al. (2009) observed that biomass of corn increased application of sunn  
239 hemp residues. Residues of fabáceas have low C/N ratio and a high rate of mineralization,  
240 thereby benefiting the following crop by high and regular supply of N (Silva et al., 2009).  
241 Increase in biomass yield by use of residue of fabáceas may enhance SOC content in soil and  
242 improve grain yield of cereals (Amado et al., 2001).

243

244 Among winter crops, pigeon pea and pearl millet produced higher above-ground  
245 biomass than corn, sunflower, oilseed radish, and sunn hemp. This trend may be drought and  
246 cold tolerance of these species in regions with dry winter. Pearl millet is used as a winter crop  
247 in dry tropical climate because of its fast growth and high biomass yield (Pacheco et al.,  
248 2011). Pigeon pea is also suitable specie to produce a high biomass yield and low rate of its  
249 decomposition because of lower polysaccharides content and higher aromatic compounds.  
250 Thus, residues of pigeon pea have higher aromaticity and hydrophobicity (Carvalho et al.,  
251 2009). Marcelo et al. (2012) also observed in an atypical wet winter (2007/2008) with 45 %  
more rain than the long-term average (1971-2000) and in a typical dry winter (2008/2009)

252 that pearl millet produced the highest above-ground biomass among all winter crops. Further,  
253 the biomass yields of pigeon pea and sunn hemp did not differ from that of the pearl millet  
254 following the corn/corn as a summer crop. These trends were attributed to adaptability of  
255 these winter crops to the Cerrado region of Brazil.

256         There were no differences in crop residues on the soil surface among summer crops  
257 (Table 2). Nonetheless, among winter crops pigeon pea had the highest quantity of residue on  
258 soil surface. Plots under pigeon pea had highest quantity of above-ground biomass  
259 contributing to residues on soil surface. Alvarenga et. al (1995) also reported that pigeon peas  
260 produced higher quantity of residues than sunn hemp, cowpea (*Vigna unguiculata*), feijão-  
261 bravo-do-ceará (*Canavalia brasiliense*), jackbean (*Canavalia ensiformis*), lab-lab (*Dolichos*  
262 *lab lab*), and mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum*) in an Ultisol. The high residue by pigeon  
263 peas was partly attributed to the deep root system which enhances water retention into soil  
264 deep layers. Indeed, root system of pigeon pea had the highest length and diameter both at  
265 ground and below-ground (10 cm depth), and the highest potential of penetration in sub-soil  
266 (Alvarenga et. al., 1995).

267         Both SOC content and stock were significantly influenced by summer cropping  
268 sequences. Soil under corn/corn had higher SOC content and stock than that under  
269 soybean/corn (soybean). Further, the root system of corn root system is more relevant to  
270 improving SOC stock than the addition of above-ground residues to the soil surface, because  
271 the C in root biomass is better stabilized into aggregates in the soil profile (Santos et al.,  
272 2011). Corn residues on the soil surface, with a wider C/N ratio compared to that of the  
273 soybean (Martins et al., 2012), are more persistent on the soil surface (Andreola et al., 2000).  
274 Residues on the soil surface protect soil aggregates against degradation of SOC by  
275 microorganisms (Carter et al., 1994; Sollins et al., 1996). This hypothesis was also confirmed  
276 for the same site by Martins et al. (2012). Martins and colleagues observed that corn as a  
277 summer crop (corn/corn and soybean/corn) increased MWD, compared to soybean/soybean  
278 because its residues are richer in pentoses mainly derived from that above-ground biomass.  
279 However, the low amount of residues on the soil surface decreased SOC content by increasing  
280 amplitude of temperature which accentuates oxidation (Eltz & Rovedder, 2005).

281         The SOC stock did not differ among winter crops. Nonetheless, the SOC content was  
282 higher in soil under grain sorghum and sunn hemp than that under sunflower. Grain sorghum  
283 and sunn hemp have deep and prolific root system with a high capacity of development in soil

284 profile which increases SOC in sub-soil (Calonego & Rosolem, 2010; Marcelo et al., 2009).  
285 Marcelo et al. (2009) also observed that grain sorghum, sunn hemp, pearl millet, and oilseed  
286 radish increased SOC content in 0 – 30 cm depth compared to that under corn, sunflower and  
287 pigeon pea.

288         Among summer crops, soil under corn/corn had higher rate of carbon sequestration  
289 than that under soybean/corn. In general, corn/corn had more residues and the biomass-C  
290 input that of the soybean/corn (West & Post, 2002). Among winter crops, soil under grain  
291 sorghum and sunn hemp had higher rate of SOC sequestration than that under sunflower.  
292 Besides, 0 – 10 cm layer of soil under all cropping sequences had a higher rate of SOC  
293 sequestration than the average rate of  $0.43 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  for Brazilian tropical soils NT  
294 management (Six et al., 2002). High rate of SOC sequestration can be attributed to winter  
295 crop established before the dry season rainfall.

296         The WDC and FD were significantly affected only by summer crops. Relatively  
297 higher WDC was observed in soil under soybean/soybean compared to that under corn/corn  
298 and lower FD than that under soybean/corn. Increase on dispersed clay and reduction of FD in  
299 soil under soybean/soybean indicated a higher erodibility and formation of compacted layers.  
300 In contrast, lower WDC under corn/corn may be associated with high soil aggregation  
301 because of high SOC content. The SOC content may be strongly correlated with WDC,  
302 indicating the importance of SOC on clay stabilization (Beutler et al., 2001).

303         The corn cultivation such as a summer crop (continuous or in rotation) increased the  
304 MWD and GMD of soil compared to the soybean (Table 2). These results may be attributed  
305 to the capacity of the corn roots in approach soil mineral particles and cementing then by the  
306 input of the SOC. The quantity, configuration and distribution of corn roots on soil surface  
307 layer strongly influence aggregation since about 83 % of corn roots are concentrated at 0 –  
308 20 cm depth (Silva et al., 2000). Further, the quantity and the turnover rate of roots contribute  
309 to aggregation (Martins et al., 2009). Increase in aggregation by corn was also reported by  
310 other authors in Oxisols from tropical regions of Brazil (Wendling et al. 2005; Andrade et al.,  
311 2009; Martins et al., 2009; Martins et al., 2012).

312         Statistically significant differences in total porosity were observed only among winter  
313 crops (Table 3). Soil under pigeon pea had higher total porosity compared to that under corn,  
314 oilseed radish, pearl millet, and sunn hemp. The largest quantity of above-ground biomass and  
315 residues on soil surface produced by pigeon pea may have contributed to high total porosity.

316 Increase in the amount of pigeon pea biomass on soil surface in NT can enhance total porosity  
317 by stimulating activity of soil microorganisms (Moura et al., 2008).

318 Neither summer nor winter crops significantly affected micro and macroporosity. Soil  
319 under summer crops (e.g. corn/corn and soybean/soybean) and that under winter crops (e.g.  
320 corn, oilseed radish, pearl millet, pigeon pea, and sunn hemp) had macroporosity of  $< 0.10 \text{ m}^3$   
321  $\text{m}^{-3}$  or above the limiting value for adequate roots aeration (Baver, 1949; Dexter, 1988). A  
322 higher range of macroporosity has implications to soil erosion, water infiltration rate during  
323 intense rainfalls and drought. Soil under short-term NT may have low macroporosity and  
324 adversely affect plant growth (Bertol et al., 2004). However, macroporosity is not restrictive  
325 in soil under long-term NT farming (Da-Silva et al., 2012) because of formation of biopores  
326 and alleviation of soil compaction (Schäffer et al., 2008) and enhanced connectivity of pores  
327 which is more important to functionality than total porosity and macroporosity (Cavaliere et  
328 al., 2009).

329 The analysis of variance showed a significant effect of interaction (summer x winter  
330 crops) on  $\ell_b$  (Table 3). Soil under corn as a winter crop had higher  $\ell_b$  for soybean/corn  
331 compared to corn/corn among summer crops. Reduction of  $\ell_b$  in soil under corn/corn (as  
332 summer and winter crops) may be caused by an increase in SOC content and MWD. Increase  
333 in SOC content decreases  $\ell_b$  and SPR, and enhances pore size distribution and AWC (Kumar  
334 et al., 2012). Furthermore, corn roots may reduce  $\ell_b$  by formation of biopores in the soil  
335 profile (Dexter, 1991).

336 The LLWR was not at the potential maximum for all crop sequences, since AWC  
337 was higher than the LLWR. The maximum value of LLWR is equal to AWC, where only soil  
338 water potential is limiting plant growth (Silva et al., 1994). Regardless of the  $\ell_b$  under all crop  
339 sequences, the water content at the SPR of 3.5 MPa was the lower limit of the LLWR and was  
340 higher than the PWP (Figure 3, 4, and 5). These trends may be attributed to absence of soil  
341 disturbance under NT, which can influence the AWC and soil (Carter et al., 1999). The SPR  
342 being the lower limit of the LLWR was also confirmed by Tormena et al. (2007) and  
343 Calonego & Rosolen (2011). Furthermore, high values of SPR on the Oxisol under study may  
344 be attributed to kaolinitic mineralogy of the clay fraction. Kaolinitic Oxisols have higher  $\ell_b$   
345 than gibbsitic Oxisols, because of the block structure and face to face configuration  
346 adjustment of the kaolinite plates (Ferreira et al., 1999). The horizontal arrangement of clay

347 particles makes a soil susceptible to compaction, especially under NT and any absence of  
348 mechanical disturbance.

349 The LLWR was higher in soil under summer cropping sequence of soybean/corn  
350 following by corn and pigeon pea as winter crop. An increase in LLWR was influenced by  
351 decrease in SPR with increase in  $\ell_b$ . Such trends may be attributed to the presence of retention  
352 pores in soil. Further, effects of increase water retention on reduction in SPR may be  
353 attributed to decrease in soil strength by lubricant effect among mineral particles (Tormena et  
354 al., 2007; Blainski et al., 2012). Calonego & Rosolem (2011) also observed that a NT crop  
355 rotation with triticale and pearl millet enhanced formation of biopores in soil by reduction of  
356 the SPR to values similar to those observed after chiseling. Yet, the SPR of soil under the  
357 majority of cropping sequences increased with increase in  $\ell_b$ , because of the increase in  
358 cohesive forces among mineral particles (Tormena et al., 2007; Blainski et al., 2012). Similar  
359 results have been reported by others (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Leão & Silva,  
360 2004; Tormena et al., 2007).

361 The largest and the smallest values of LLWR were observed under sunflower as  
362 winter crop when cultivated within corn/corn and soybean/soybean as summer crops. A small  
363 value of LLWR indicates degradation of soil structure and the need for sustainable  
364 management. Thus, LLWR is an index of soil quality in relation to plant growth (Letey, 1985).

365 The upper limit of LLWR, in soil under all crop sequences was initially represented  
366 by the moisture field capacity. Field capacity as the upper limit of LLWR suggests that  
367 cropping sequences are increasing soil water content and maintaining a minimum value of the  
368 AFP necessary for adequate root aeration. Thus, field capacity as the upper limit for LLWR  
369 was replaced by the AFP at different values of  $\ell_b$  observed under each cropping sequence. An  
370 earlier replacement occurred in soil under soybean/corn on summer and oilseed radish on  
371 winter and soybean/soybean on summer and pearl millet on winter with a  $\ell_b$  of 1.39 Mg ha<sup>-1</sup>.  
372 Similarly, a late replacement occurred in corn/corn on summer with pigeon pea on winter  
373 with a  $\ell_b$  of 1.46 Mg ha<sup>-1</sup>. Early replacement may be attributed to reduction in macropores by  
374 increase in  $\ell_b$  and increasing soil water retention but decreasing AFP. The AFP becomes  
375 restrictive under NT in those cropping sequences which decrease macroporosity, particularly  
376 those by biopores which facilitate drainage (Tormena et al., 2007). However, late replacement  
377 may signify that cropping sequences are increasing stable and continuous biopores and  
378 improving aeration (Tormena et al., 2007).

379           The average  $\ell_b$  under all cropping sequences was lower than the critical  $\ell_b$ . Yet, soil  
 380 under some cropping sequences had  $\ell_b$  values higher than the critical  $\ell_b$ . These cropping  
 381 sequences included: *i*) soybean/corn as summer crop followed by winter crops of sunflower  
 382 (14.3%), pigeon pea (17.9%), grain sorghum (7.1%), and sunn hemp (3.6%); *ii*) corn/corn  
 383 followed by winter crops of pearl millet (7.1%); and *iii*) soybean/soybean followed by winter  
 384 crops of corn (14.3%), sunflower (10.7%), oilseed radish (10.7%), pearl millet (3.6%), and  
 385 grain sorghum (3.6%). Critical  $\ell_b$  was associated with low water content in soil under winter  
 386 crops within each summer cropping sequences. These cropping sequences may be prone to  
 387 restricted crop growth and development. In the present study, the critical  $\ell_b$  values were  $>$   
 388  $1.30 \text{ Mg m}^{-3}$  reported by Tormena et al. (2007) in an Oxisol under NT for cropping sequence  
 389 of soybean-wheat (18%), corn-wheat-soybean-oat-soybean-oat rotation (18 %) and rotation  
 390 with scarification (5 %), with the same critical value of the SPR (3.5 MPa).

391           The  $\ell_b$  was positively correlated with water content. Increase in  $\ell_b$  and consequently  
 392 water content decreases the AFP which can restrict root growth (Tormena et al., 2007).  
 393 Normal stress by wheel traffic can reduce soil volume, decrease pore diameter, and reduce  
 394 water retention at high matric potentials (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998). Increase in  
 395 water retention is important to AWC for plants growth during the dry season. But, decline in  
 396 AFP may reduce air porosity during seasons of intense rainfall. Both conditions are common  
 397 in soils of the tropical regions.

398

399

## 400 **CONCLUSIONS**

401

402           Cropping sequences strongly influence soil structure.

403           Soil under corn/corn has higher soil organic carbon content, stock and rate of carbon  
 404 sequestration compared to that soil under soybean/corn and higher geometric mean diameter  
 405 than that soil under soybean/soybean.

406           Soil under sunn hemp and grain sorghum as winter crops has higher soil organic  
 407 carbon content and rate of carbon sequestration compared to that under sunflower.

408           Cultivation of pigeon pea increases soil total porosity compared to those soils under  
 409 corn, oilseed radish, pearl millet and grain sorghum.

410 Soil penetration resistance is the lower limit of the least limiting water range for all  
411 crop sequences.

412 Soil under soybean/corn cultivate with corn and pigeon pea increase the least  
413 limiting water range by decrease of soil penetration resistance with increase in soil bulk  
414 density.

415 The largest and smallest values of the least limiting water range are observed in soil  
416 under sunflower within corn/corn and soybean/soybean.

417 Air-filled porosity is less limiting to root growth in soil under pigeon pea within a  
418 corn/corn as summer crop.

419

420

## 421 **ACKNOWLEDGMENTS**

422

423 We are grateful to CAPES Foundation, Ministry of Education of Brazil, for  
424 scholarship to the first author (Process 8745/11-0). Also, São Paulo State University and The  
425 Ohio State University by exchange to first author.

426

427

## 428 **LITERATURE CITED**

429

430 ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J.

431 Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e  
432 recuperação de solos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 30:175-185, 1995.

433 AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de  
434 cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da  
435 qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:189-197, 2001.

436 ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Cover crops and structure quality of a  
437 Latossol under no-tillage. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambiental*, 13:411–418, 2009.

438 ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEWSKI, N. & JUCKSCH, I.A. Cobertura vegetal de  
439 inverno e a adubação orgânica e, ou mineral influenciando a sucessão feijão/milho.  
440 *R. Bras. Ci. Solo*, 24:867-874, 2000.

441 BAVER, L.D. Practical values from structure analyses of soils. *Soil Sci.*, 68:1–13, 1949.

- 442 BAYER C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J.  
443 Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.*,  
444 86:237–245, 2006.
- 445 BERNOUX M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; SIQUEIRA NETO, M.; METAY, A.;  
446 PERRIN, A.S.; SCOPEL, E.; TANTELY, R.; BLAVET, D.; PICCOLO, M.C.;  
447 PAVEI, M. & MILNE, E. Cropping Systems, Carbon Sequestration and Erosion in  
448 Brazil: A Review. In: LICHTFOUSE, E.; NAVARRETE, M.; DEBAEKE, P.;  
449 VÉRONIQUE, S. & ALBEROLA, C., ed. *Sustainable Agriculture*. Springer  
450 Netherlands, 2009. p.75-85.
- 451 BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR,  
452 W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em  
453 rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. *Rev. Bras. Ciência*  
454 *Solo.*, 28:155-163, 2004.
- 455 BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; PEREIRA FILHO, I.A. &  
456 CRUZ, J.C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o  
457 manejo na região dos cerrados no Estado de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:129-  
458 136, 2001.
- 459 BLAINSKI, E.; TORMENA, C.; GUIMARÃES, R.M.L. & NANNI, M.R. Qualidade física  
460 de um Latossolo sob Plantio direto influenciada pela cobertura do solo. *R. Bras. Ci.*  
461 *Solo*, 36:79-87, 2012.
- 462 CALONEGO J.C. & ROSOLEM, C.A. Least limiting water range in soil under crop rotations  
463 and chiseling. *R. Bras. Ci. Solo.*, 35:759-771, 2011.
- 464 CALONEGO, J.C. & ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and yield in rotation with cover  
465 crops under chiseling and no-till. *Eur. J. Agron.*, 33:242–249, 2010.
- 466 CARTER, M.R.; ANGERS, D.A. & KUNELIUS, H.T. Soil structure and organic matter  
467 fractions under perennial poáceas. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1194-1199, 1994.
- 468 CARTER, M.R.; ANGERS, D.A. & TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical  
469 condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid  
470 climate. *Soil Sci.*, 164:101-110, 1999.
- 471 CARVALHO, A.M.; BUSTAMANTE, M.M.C.; ALCÂNTARA, F.A.; RESCK, I.S. &  
472 LEMOS, S.S. Characterization by solid-state CPMAS <sup>13</sup>C NMR spectroscopy of

- 473 decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil.  
474 Soil Till. Res., 102:144-150, 2009.
- 475 CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R. &  
476 HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil structure  
477 properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. Soil Till. Res., 103:158-164, 2009.
- 478 CORÁ, J.E. Sistema de semeadura direta na região do município de Jaboticabal, SP: Efeitos  
479 em atributos do solo e produtividade de culturas. Jaboticabal, Universidade Estadual  
480 Paulista, 2006. 87p. (Tese de Livre Docência)
- 481 DANE, J.H. & HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H. & TOPP, C., ed.  
482 Methods of soil analysis: Structure methods. Madison, SSSA, 2002. p.688-690.
- 483 DA-SILVA, V.L.; DIECKOW, J.; MELLEK, J.E.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.;  
484 PAULETTI, V. & VEZZANI, F.M. Melhoria da estrutura de um latossolo por  
485 sistemas de culturas em plantio direto nos Campos Gerais do Paraná. . R. Bras. Ci.  
486 Solo., 36:983-992, 2012.
- 487 DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. Soil Till. Res., 11:199-238,  
488 1988.
- 489 DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. Soil Till. Res., 20:87-100, 1991.
- 490 EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth  
491 of oats in tilled and untilled loess soil. Soil Till. Res., 3:261-275, 1983.
- 492 ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils  
493 under contrasting management regimes. Can. J. Soil Sci., 75:529-538, 1995.
- 494 ELTZ, F.L.F. & ROVEDDER, A.P.M. Revegetação e temperatura do solo em áreas  
495 degradadas no sudoeste do Rio Grande do Sul. R. Bras. Agroci., 11:193-200, 2005.
- 496 FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura  
497 de Latossolos da região sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.
- 498 FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; OLIVEIRA, S.O.  
499 & ALMEIDA, B.G. Improvement of a testing apparatus for dynamometry:  
500 procedures for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile  
501 strength of soil aggregates. Rev. Bras. Ci. Solo, 35:373-387, 2011.
- 502 FLINT, L.E. & FLINT, A.L. Porosity. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C. ed. Methods of soil  
503 analysis: physical methods. Madison, SSSA, 2002. p.241-253.

- 504 GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. ed. Methods of soil  
505 analysis. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986. p.383–411.
- 506 GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water  
507 suction on oxygen diffusion, redox potencial and elongation of corns roots. Soil Sci.  
508 Soc. Am. J., 32:180-186, 1968.
- 509 KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE,  
510 A. Methods of Soil Analysis: Structure and Mineralogical Methods. Madison, ASA.,  
511 1986. p.635-660.
- 512 KUMAR, S.; KADONU, A.; LAL, R. & DICK, W. Long-Term No-Till Impacts on Organic  
513 Carbon and Properties of Two Contrasting Soils and Corn Yields in Ohio. Soil Sci.  
514 Soc. Am. J., 76:1798-1809, 2012.
- 515 LEÃO, T.P. & SILVA, A.P. A simplified excel algorithm for estimating the least limiting  
516 water range of soils. Sci. Agric., 61:649-654, 2004.
- 517 LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. Soil Sci.,  
518 1:277–294, 1985.
- 519 MARCELO, A.V.; CORÁ, J. E. & FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de  
520 semeadura direta. I-produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. R. Bras. Ci.  
521 Solo, 36:1553-1567, 2012.
- 522 MARCELO, A.V.; CORA, J.E.; FERNANDES, C.; MARTINS, M.R. & JORGE, R.F.  
523 Cropping sequences in no-tillage system: effects on soil fertility and soybean, maize  
524 and rice production. R. Bras. Ci. Solo, 33:417-428, 2009.
- 525 MARTINS, M.R.; ANGERS, D.A. & CORA, J.E. Carbohydrate Composition and Water-  
526 Stable Aggregation of an Oxisol as Affected by Crop Sequence under No-Till. Soil  
527 Biol. Biochem., 76:475–484, 2012.
- 528 MARTINS, M.R.; CORÁ, J.E.; JORGE, R.F. & MARCELO, A.V. Crop type influences soil  
529 aggregation and organic matter under no-tillage. Soil Tillage Res. 104:22–29, 2009.
- 530 MOURA, E.G.; ALBUQUERQUE, J.M. & AGUIAR, A.C.F. Growth and productivity of  
531 corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. Sci. Agric.,  
532 65:204-208, 2008.
- 533 NIMMO, J.R. & PERKINS, K.S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H. &  
534 TOPP, G.C. ed. Methods of Soil Analysis. Madison, SSSA, 2002. p. 317–327.

- 535   PACHECO, L.P.; LEANDRO, W.M.; MACHADO, P.L.O.A.; ASSIS, R.L.; COBUCCI, T.;  
536           MADARI, B.E. & PETTER, F.A. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de  
537           nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. . *Pesq. Agropec. Bras.*, 46:17-25,  
538           2011.
- 539   REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- 540   REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HÅKANSSON, I.  
541           Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production  
542           in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242–254, 2009.
- 543   REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. & LU, X. Indicators of  
544           good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110:131–146,  
545           2002.
- 546   ROMANO, N.; HOPMANS, J.W. & DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H. & TOPP, C.  
547           ed. *Methods of soil analysis: structure methods*. Madison, SSSA, 2002. p.692-698.
- 548   SANTOS, N.Z.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI,  
549           V. & PIVA, J.T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till  
550           rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Till. Res.*, 111:208-218,  
551           2011.
- 552   SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water  
553           availability. *Agron. J.* 88:644-651, 1996.
- 554   SCHÄFFER, B.; STAUBER, M.; MUELLER, T.L.; MÜLLER, R. & SCHULIN, R. Soil and  
555           macropores under uniaxial compression. Mechanical stability of repacked soil and  
556           deformation of different types of macropores. *Geoderma*, 146:183–191, 2008.
- 557   SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range.  
558           *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- 559   SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; VILLANUEVA, F.C.A. & ESPINA, F.S.C. Aproveitamento  
560           de nitrogênio pelo milho, em razão da adubação verde, nitrogenada e fosfatada. *Pesq.*  
561           *Agropec. Bras.*, 44:118-127, 2009.
- 562   SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e  
563           estabilização de agregados do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 21:113-117, 1997.
- 564   SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e  
565           sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*,  
566           24:191-199, 2000.

- 567 SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M. & ALBRECHT, A. Soil organic  
568 matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage.  
569 *Agronomie*, 22:755–775, 2002.
- 570 SOLLINS, P.; HOMMAN, P. & CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil  
571 organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74:65-105, 1996.
- 572 STOTT, D.E.; STROO, H.F.; ELLIOTT, L.F.; PAPENDICK, R.I. & UNGER, P.W. Wheat  
573 residue loss from fields under no-till management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:92-98,  
574 1990.
- 575 TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D.; COOK, F.J.; KIRBY, J.M. & CARTER, M.R. Physical  
576 attributes of soil quality. In: GREGORICH, E.G. & CARTER, M.R. ed. *Soil Quality  
577 for Crop Production and Ecosystem Health*. New York, Elsevier, 1997. p.21-58.
- 578 TORMENA C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do  
579 intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de  
580 plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- 581 TORMENA C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo  
582 de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- 583 VEST, G.; WEBER, D.F. & SLOGER, C. Nodulation and N fixation. In: Caldwell, B.E. ed.  
584 *Soybeans, Improvement, Production and Uses*. Madison, ASA, 1973. p. 373-382,
- 585 WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S. & NEVES, J.C.L. Organic carbon and  
586 aggregate stability of a Red Latossol under different managements. *Pesq. agropec.  
587 bras.*, 40:487–494, 2005.
- 588 WEST T.O. & POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop  
589 rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:1930-1946, 2002.
- 590 WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction  
591 effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1403-1409, 2004.
- 592 YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical  
593 nature of erosion losses. *Agronomy Journal*, 28:337-351, 1936.
- 594 YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination  
595 of organic carbon in soil. *Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

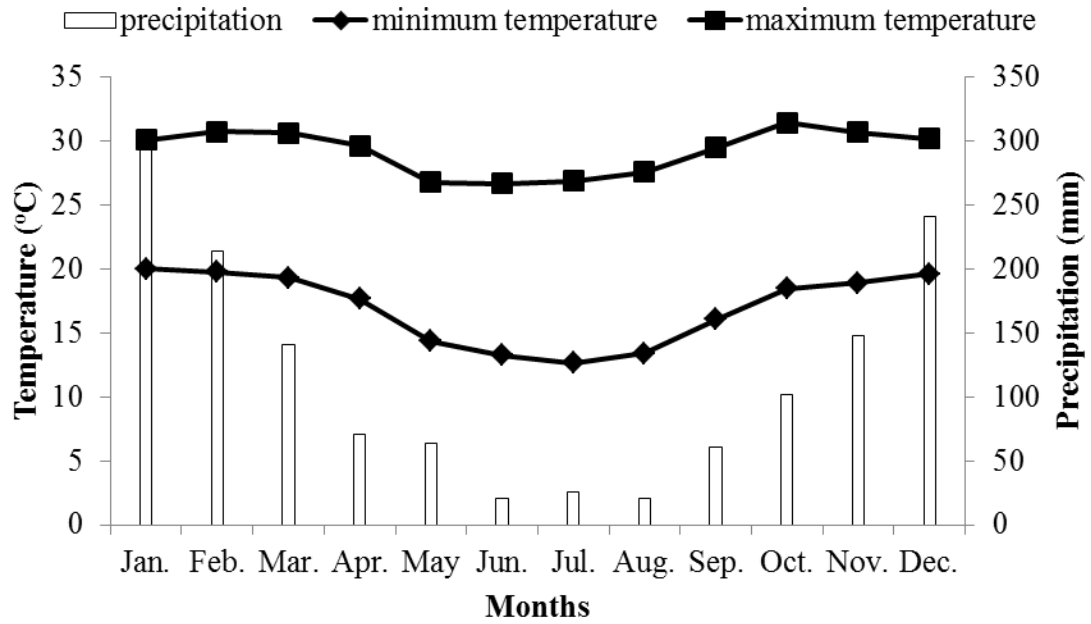


Figure 1. Long-term monthly average maximum and minimum temperatures and precipitation at the experimental site (1971 – 2010).

597 Table 1. Above-ground biomass (AGB) and residues on the soil surface (RSS) by winter  
 598 crops, and soil organic carbon content (SOCc), soil organic carbon stock (SOCs),  
 599 water-dispersed clay (WDC), and flocculation degree (FD) determined from 0 to 10  
 600 cm depth of an Oxisol, under summer and winter crop sequences, in no-till system.

|                          | <b>AGB</b>                     | <b>RSS</b>         | <b>SOCc</b>        | <b>SOCs</b>         | <b>WDC</b>         | <b>FD</b>         |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| <b>Summer Crops (S)</b>  | -----Mg ha <sup>-1</sup> ----- |                    | g kg <sup>-1</sup> | Mg ha <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> | %                 |
| Soybean/Corn             | 4.89 a                         | 5.07               | 14.53 b            | 13.37 b             | 378 ab             | 36 a              |
| Corn/Corn                | 3.03 b                         | 4.86               | 17.07 a            | 15.70 a             | 368 b              | 32 ab             |
| Soybean/Soybean          | 4.50 a                         | 5.20               | 16.38 ab           | 15.07 ab            | 383 a              | 30 b              |
| F Test                   | 20.97*                         | 0.36 <sup>ns</sup> | 3.68*              | 3.67*               | 7,9*               | 7,1*              |
| CV (%)                   | 23.8                           | 32.4               | 13.6               | 19.6                | 3,4                | 17,9              |
| <b>Winter Crops (W)</b>  |                                |                    |                    |                     |                    |                   |
| Corn                     | 2.51 c                         | 5.54 ab            | 16.18 ab           | 14.88               | 357                | 32                |
| Sunflower                | 2.60 c                         | 3.81 c             | 15.34 b            | 14.11               | 356                | 33                |
| Oilseed Radish           | 3.22 c                         | 4.35 bc            | 15.72 ab           | 14.47               | 378                | 31                |
| Pearl millet             | 4.88 ab                        | 5.18 abc           | 15.47 ab           | 14.23               | 371                | 32                |
| Pigeon Pea               | 5.24 a                         | 6.35 a             | 15.60 ab           | 14.35               | 370                | 34                |
| Grain sorghum            | 3.96 bc                        | 5.14 abc           | 16.82 a            | 15.47               | 402                | 32                |
| Sunn hemp                | 2.58 c                         | 3.57 c             | 16.82 a            | 15.47               | 397                | 35                |
| F Test                   | 18.56*                         | 9.12*              | 1.59*              | 1.58 <sup>ns</sup>  | 1,5 <sup>ns</sup>  | 1,2 <sup>ns</sup> |
| CV (%)                   | 36.4                           | 36.6               | 9.1                | 9.3                 | 11,9               | 11,0              |
| <b>Interaction S x W</b> |                                |                    |                    |                     |                    |                   |
| F Test                   | 5.31 <sup>ns</sup>             | 1.46 <sup>ns</sup> | 1.59 <sup>ns</sup> | 1.61 <sup>ns</sup>  | 1,0 <sup>ns</sup>  | 1,1 <sup>ns</sup> |
| CV (%)                   | 20.5                           | 32.0               | 9.8                | 9.7                 | 4,3                | 11,3              |

Values followed by lowercase letters on the same column are significantly different by Tukey test ( $P < 0.05$ ). \*  $p < 0.05$ . <sup>ns</sup> not significantly.



603 Table 2. Water stable aggregates (WSA), mean weight diameter (MWD), geometric mean  
 604 diameter (GMD), total porosity (TP), microporosity (MI), macroporosity (MA), soil  
 605 organic carbon content (SOCc), soil bulk density ( $\ell_b$ ), and soil organic carbon stock  
 606 (SOCs) determined on 0 to 10 cm depth of a Red Latossol (Oxisol) under summer  
 607 and winter cropping sequences in no-till system.

| Summer Crops (S)         | WSA                | MWD                | GMD                                       | TP                 | MI                 | MA                 | BD                 |
|--------------------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                          | %                  | -----mm-----       | -----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ----- |                    |                    |                    | Mg m <sup>-3</sup> |
| Soybean/Corn             | 89.66              | 3.55 a             | 2.84 a                                    | 0.47               | 0.37               | 0.10               | 1.43               |
| Corn/Corn                | 90.89              | 3.63 a             | 2.92 a                                    | 0.46               | 0.39               | 0.07               | 1.41               |
| Soybean/Soybean          | 88.75              | 3.18 b             | 2.46 b                                    | 0.48               | 0.39               | 0.09               | 1.42               |
| F Test                   | 0.5 <sup>ns</sup>  | 13.28*             | 11.12*                                    | 4.47 <sup>ns</sup> | 2.31 <sup>ns</sup> | 2.03 <sup>ns</sup> | 0.36 <sup>ns</sup> |
| CV (%)                   | 7.78               | 8.7                | 12.4                                      | 5.4                | 10.0               | 61.3               | 3.4                |
| <b>Winter Crops (W)</b>  |                    |                    |   |                    |                    |                    |                    |
| Corn                     | 89.10 b            | 3.58               | 2.90                                      | 0.46 b             | 0.39               | 0.08               | 1.44               |
| Sunflower                | 87.17 b            | 3.50               | 2.78                                      | 0.48 ab            | 0.39               | 0.10               | 1.42               |
| Oilseed Radish           | 88.22 b            | 3.43               | 2.57                                      | 0.46 b             | 0.38               | 0.08               | 1.41               |
| Pearl millet             | 89.41 ab           | 3.37               | 2.67                                      | 0.46 b             | 0.38               | 0.08               | 1.41               |
| Pigeon Pea               | 89.48 ab           | 3.17               | 2.44                                      | 0.50 a             | 0.40               | 0.09               | 1.40               |
| Grain sorghum            | 91.25 ab           | 3.67               | 3.00                                      | 0.48 ab            | 0.38               | 0.10               | 1.43               |
| Sunn hemp                | 93.74 a            | 3.47               | 2.82                                      | 0.46 b             | 0.38               | 0.08               | 1.43               |
| F Test                   | 5.97*              | 0.67 <sup>ns</sup> | 0.88 <sup>ns</sup>                        | 7.85*              | 1.28 <sup>ns</sup> | 1.00 <sup>ns</sup> | 3.52 <sup>ns</sup> |
| CV (%)                   | 2.9                | 16.8               | 22.5                                      | 3.7                | 6.63               | 36.6               | 1.6                |
| <b>Interaction S x W</b> |                    |                    |   |                    |                    |                    |                    |
| F Test                   | 1.26 <sup>ns</sup> | 0.35 <sup>ns</sup> | 0.43 <sup>ns</sup>                        | 2.30 <sup>ns</sup> | 1.89 <sup>ns</sup> | 4.00 <sup>ns</sup> | 2.72*              |
| CV (%)                   | 4.84               | 17.0               | 22.1                                      | 5.6                | 6.8                | 30.7               | 2.0                |

Values followed by lowercase letters on the same column are significantly different by Tukey test ( $p < 0.05$ ). \*  $p < 0.05$ . <sup>ns</sup> not significantly.

609 Table 3. Soil bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) determined in an Oxisol under cropping sequences in no-  
 610 till.

| Winter Crops   | Summer Crops       |    |                    |    |                     |     | F test             |
|----------------|--------------------|----|--------------------|----|---------------------|-----|--------------------|
|                | Soybean/Corn       |    | Corn/Corn          |    | Soybean/<br>Soybean |     |                    |
| Corn           | 1.45               | Aa | 1.40               | Ba | 1.43                | ABa | 4.93 <sup>*</sup>  |
| Sunflower      | 1.40               | Aa | 1.41               | Aa | 1.45                | Aa  | 4.38 <sup>ns</sup> |
| Oilseed radish | 1.40               | Aa | 1.42               | Aa | 1.40                | Aa  | 0.58 <sup>ns</sup> |
| Pearl millet   | 1.42               | Aa | 1.41               | Aa | 1.42                | Aa  | 0.13 <sup>ns</sup> |
| Pigeon pea     | 1.44               | Aa | 1.37               | Aa | 1.39                | Aa  | 3.17 <sup>ns</sup> |
| Grain sorghun  | 1.43               | Aa | 1.44               | Aa | 1.43                | Aa  | 0.20 <sup>ns</sup> |
| Sunn hemp      | 1.42               | Aa | 1.44               | Aa | 1.44                | Aa  | 0.53 <sup>ns</sup> |
| F test         | 3.47 <sup>ns</sup> |    | 2.43 <sup>ns</sup> |    | 2.18 <sup>ns</sup>  |     |                    |

Values followed by lowercase letters on the same column, and uppercase letters in the same line are significantly different by Tukey test ( $p < 0.05$ ). <sup>\*</sup>  $p < 0.05$ . <sup>ns</sup> not significantly.

611

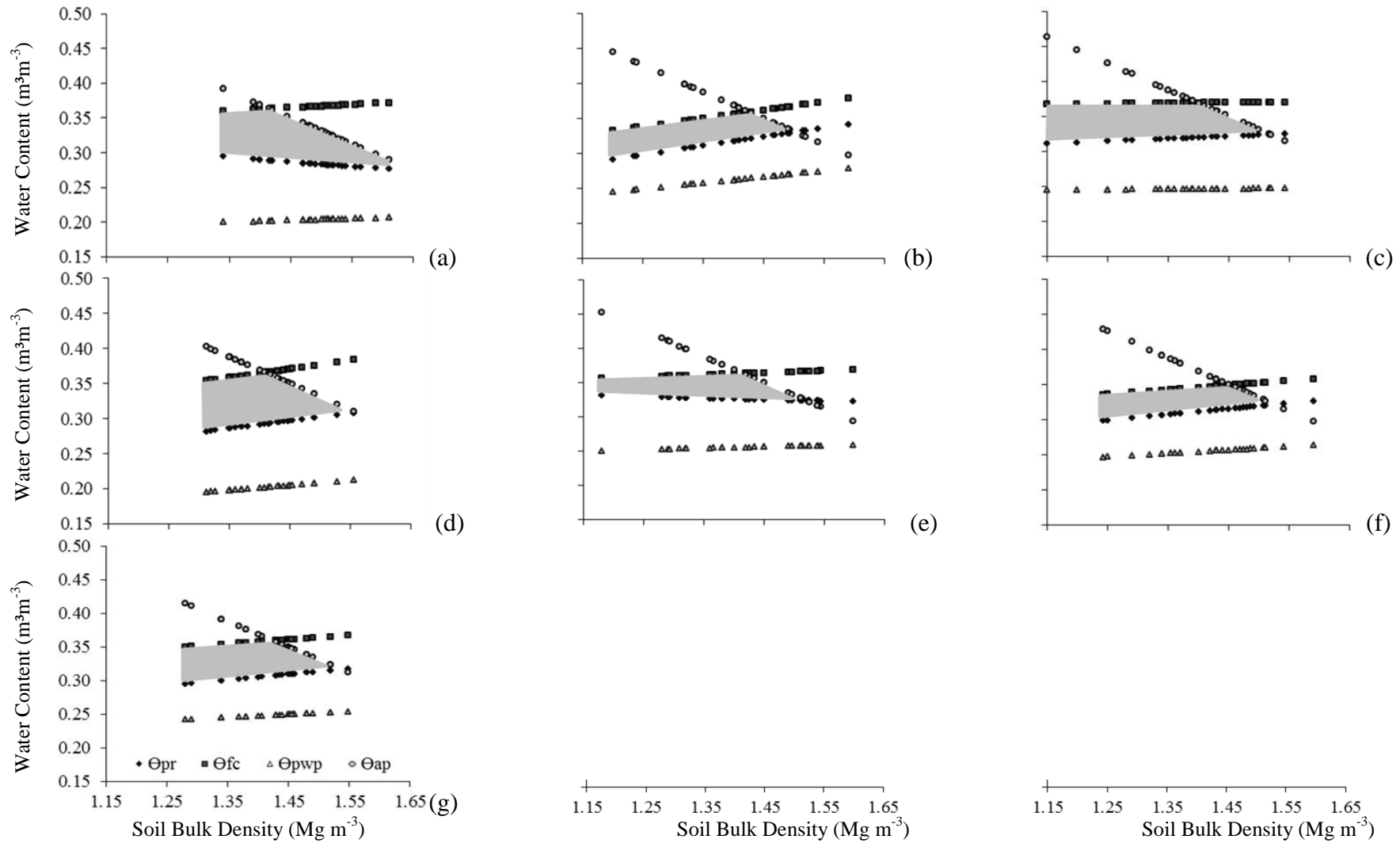


Figure 3. Least limiting water range on soil under winter crops (a: corn, b: sunflower, c: oilseed radish, d: pearl millet, e: pigeon pea, f: grain sorghum, and g: sunn hemp) within soybean/corn on summer. Where:  $\circ$ : air-filled porosity,  $\square$ : field capacity,  $\diamond$ : soil penetration resistance, and  $\triangle$ : permanent wilting point.

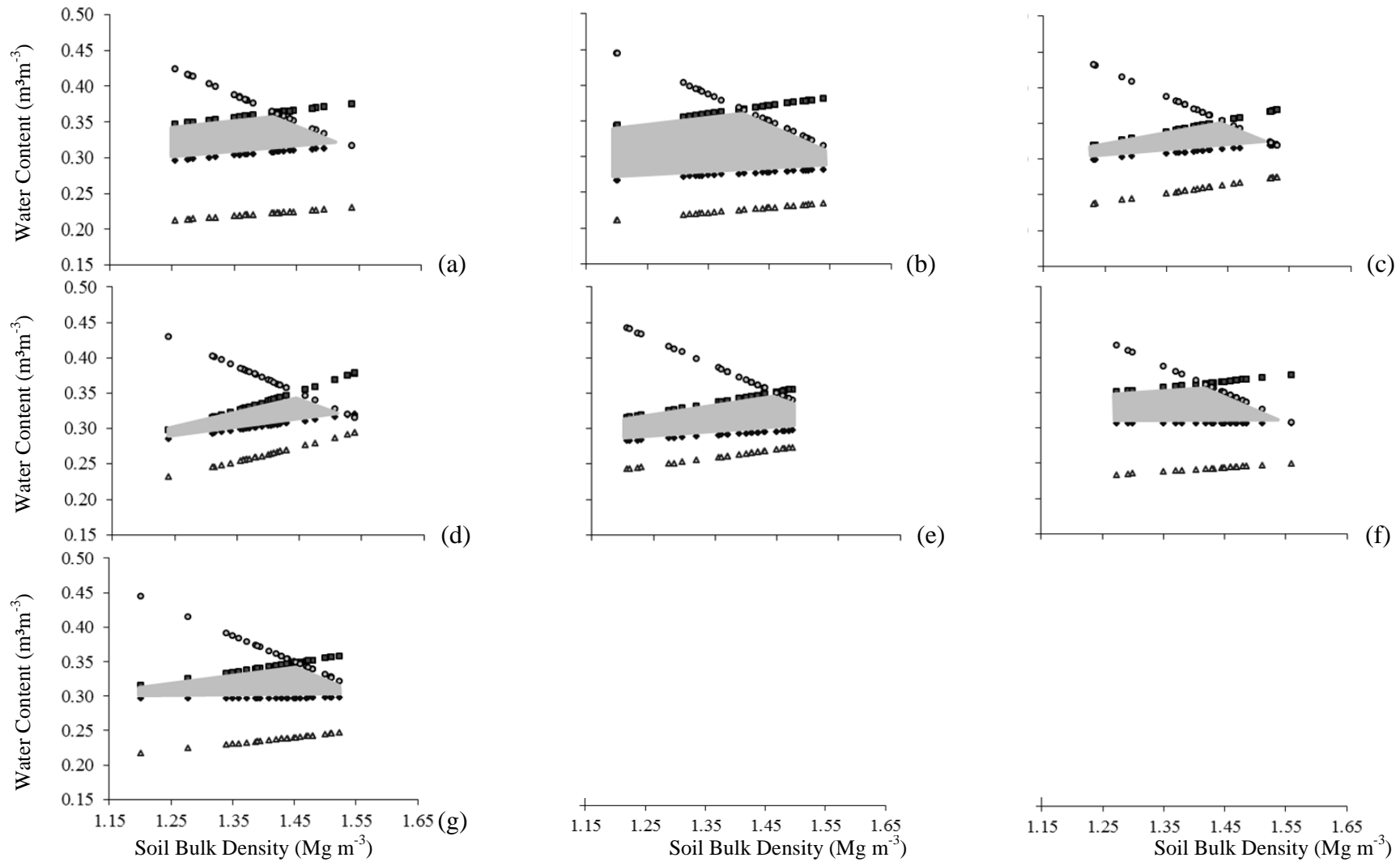


Figure 4. Least limiting water range under winter crops (a: corn, b: sunflower, c: oilseed radish, d: pearl millet, e: pigeon pea, f: grain sorghum, and g: sunn hemp) within corn/corn on summer. Where: o: air-filled porosity, □: field capacity, ∇: soil penetration resistance, and Δ: permanent wilting point.

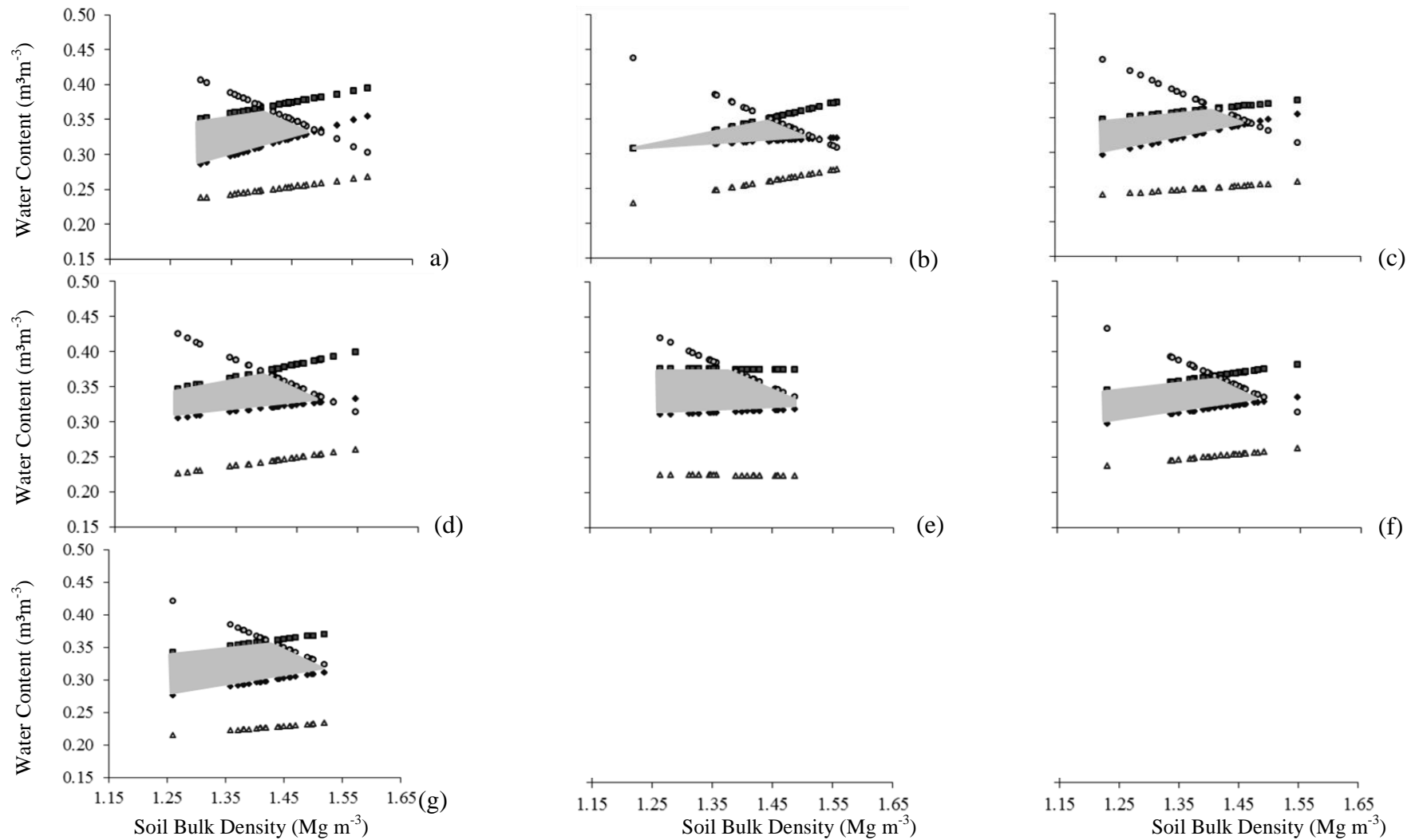


Figure 5. Least limiting water range under winter crops (a: corn, b: sunflower, c: oilseed radish, d: pearl millet, e: pigeon pea, f: grain sorghum, and g: sunn hemp) within soybean/soybean on summer. Where: o: air-filled porosity, □: field capacity, ◇: soil penetration resistance, and Δ: permanent wilting point.

1 **Capítulo 4 - SEQUESTRO DE CARBONO E A AGREGAÇÃO DE UM**  
2 **LATOSSOLO VERMELHO SOB SEQUÊNCIAS DE CULTURAS EM**  
3 **SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA<sup>1</sup>**

4  
5 Getulio de Freitas Seben Junior<sup>2</sup>, José Eduardo Corá<sup>3</sup>, Rattan Lal<sup>4</sup>

6  
7 **RESUMO**

8 O acúmulo de carbono (C) no solo sob condições de clima tropical é dificultado pela  
9 alta degradação da matéria orgânica do solo (MOS) causada pelos microrganismos e pelas  
10 altas temperaturas e umidade. Assim, a adoção do sistema de semeadura direta (SSD) com  
11 plantas, em rotação de culturas, que adicionem grandes quantidades de C via resíduos e raízes  
12 é fundamental para a melhoria da agregação do solo que protege o C fisicamente. Portanto, o  
13 objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das sequências de culturas sobre o conteúdo de C e, a  
14 influência deste, sobre a agregação de um Latossolo Vermelho argiloso, determinados na  
15 camada de 0 – 10 cm. Os tratamentos foram compostos por três sequências de culturas de  
16 verão: milho/milho (*Zea mays* L.) (MM); soja/soja (*Glycine max* L. Merrill) (SS); e,  
17 soja/milho (SM); e por sete culturas de inverno: milho, girassol (*Helianthus annuus* L.), nabo  
18 forrageiro (*Raphanus sativus* L.), milheto (*Pennisetum americanum*), feijão guandu (*Cajanus*  
19 *cajan* (L.) Millsp), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária (*Crotalaria juncea* L.).  
20 O cultivo de soja no verão (SS e SM) e o cultivo de crotalária no inverno proporcionaram as  
21 maiores taxas de sequestro de C (0,68, 0,68 e 0,79 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) pela adição de N via  
22 resíduos, uma vez que, foram verificadas correlações entre o conteúdo total de C com o  
23 conteúdo total de N (r = 0,90, P < 0,001, n = 63). A agregação do solo apresentou correlação  
24 apenas com o C contido na fração COP-F (r = 0,32, P < 0,001, n = 63) e a maior agregação foi  
25 proporcionado pela SM no verão e pelo sorgo no inverno.

26  
27 **Termos de indexação:** matéria orgânica particulada, rotação de culturas, plantas de  
28 cobertura, culturas de inverno, estabilidade dos agregados do solo

---

<sup>1</sup> Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em 04/07/2013.

<sup>2</sup> Doutorando em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista - UNESP, Câmpus of Jaboticabal, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n. Jaboticabal, SP, 14884-900, Brasil. E-mail: getulioseben@gmail.com

<sup>3</sup> Professor Adjunto pela Universidade Estadual Paulista - UNESP, Câmpus of Jaboticabal, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n. Jaboticabal, SP, 14884-900, Brasil. E-mail: cora@fcav.unesp.br

<sup>4</sup> Professor Emérito pela The Ohio State University, School of Environment and Natural Resources, 2021 Coffey Rd., Columbus, OH 43210, USA. E-mail: lal.1@osu.edu

29 **SUMMARY: CARBON SEQUESTRATION AND SOIL AGGREGATION OF AN**  
30 **OXISOL UNDER CROP SEQUENCES IN NO-TILLAGE SYSTEM**

31

32 Soils of the tropical regions are prone to degradation by intense weathering process  
33 due to high temperatures and rainfall. But, adoption of no-till system (NT) and crop rotation  
34 increase soil quality by soil organic matter addition. The objective of this study was to  
35 evaluate the effect of crop sequences in NT on soil organic carbon (OC) and its influences on  
36 aggregation of a clayey Oxisol, determined at 0 – 10 cm depth. The treatments were compost  
37 by three summer crops: corn/corn (*Zea mays* L.) (CC); soybean/soybean (*Glycine max* L.  
38 Merrill) (SS); and soybean/corn (SC), and seven winter crops: corn, sunflower (*Helianthus*  
39 *annuus* L.), oilseed radish (*Raphanus sativus* L.), pearl millet (*Pennisetum americanum*),  
40 pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and  
41 sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.). Soybean on summer (SC and SS) and sunn hemp on  
42 winter increased OC stock (16.24, 16.30 and 17.24 Mg ha<sup>-1</sup>) and rate of C sequestration (0.68,  
43 0.68 and 0.79 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) due to rapidly residues degradation of this fabáceas, since, OC  
44 stock was correlated with particulate organic matter medium (POM-M) and fine (POM-F) (r =  
45 0.41, P < 0.001; and r = 0.36, P < 0.01, n = 63) because these fractions are constituted by  
46 slightly decomposed residues. Increase of OC, determined in the soil fractions, was highly  
47 correlated with nitrogen addition (r > 0.90, P < 0.001, n=63). The mean weight diameter of  
48 soil aggregates (MWD) was correlated with OC content at POM-F (r = 0.32, P < 0.001, n =  
49 63) and the highest values were proportionate by SCR on summer and grain sorghum on  
50 winter.

51

52 **Index-terms:** Particulate organic carbon, crop rotation, cover crops, winter crops, soil  
53 aggregate stability

54

55

56 **INTRODUÇÃO**

57

58 Os solos sob condições de clima tropical apresentam uma alta redução no conteúdo de  
59 carbono (C) devido a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) causada pelas altas  
60 temperaturas, umidade e atividade microbiana (Six et al., 2002). Em regiões de clima tropical,

61 os Latossolos representam mais que 60 % dos solos (Sánchez & Salinas 1983) e cobrem mais  
62 de 60 % do território brasileiro (Abdala et al., 2012). Nos Latossolos o conteúdo global de C é  
63 de 150 Pg (Lal, 2012), distribuídos, principalmente, nos primeiros 20 cm de profundidade  
64 (Guo & Gifford, 2002). Assim, é de fundamental importância avaliar os efeitos dos sistemas  
65 de uso e manejo, bem como de sequências de culturas, sobre a dinâmica do C e do N nos  
66 Latossolos (Bayer et al., 2006) para minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O, que contribuem  
67 para as mudanças ambientais globais, para reduzir a erosão e preservar a biodiversidade do  
68 solo (Six et al., 2002) e para proporcionar a qualidade física, química e biológica do solo (Sá e  
69 Lal, 2009).

70 A adoção do sistema de semeadura direta (SSD) em Latossolos proporciona um  
71 incremento médio no conteúdo de C de 0,35 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Bayer et al., 2006), podendo  
72 chegar a 1,30 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> com o uso intensivo de um complexo esquema de sequências  
73 de culturas (Sá et al., 2013), atingindo um equilíbrio de C no solo em até 40 anos (Sá et al.,  
74 2001). As plantas influenciam direta e indiretamente o acúmulo de C e N e a agregação do  
75 solo, devido à ação direta pela adição de C via biomassa da parte aérea e das raízes, pela ação  
76 direta do sistema radicular na agregação do solo e pela influência nos ciclos de umedecimento  
77 e secagem do solo, e, indiretamente, devido às influências sobre os microrganismos do solo  
78 (Angers & Caron, 1998).

79 O uso intensivo e complexo das sequências de culturas para proporcionar o acúmulo  
80 de C e N e, conseqüentemente, a agregação do solo, depende das espécies de plantas  
81 utilizadas e de sua adaptabilidade às condições climáticas regionais (Campos et al., 2011;  
82 Martins et al., 2012a; Sá et al., 2013). As fabáceas e as poáceas são as mais utilizadas. As  
83 fabáceas adicionam grandes quantidades de N, fixado à biomassa, e proporcionam o acúmulo  
84 de C ao solo em até 0,88 Mg C ano<sup>-1</sup> (Diekow et al., 2005; Boddey et al., 2010; Campos et al.,  
85 2011), devido à estreita relação C:N, à rápida degradação dos resíduos e à associação das  
86 raízes com as micorrizas que atuam na formação dos agregados do solo, que protegem o C e o  
87 N adicionados ao solo (Zotarelli et al., 2007; Conceição et al., 2013). Por outro lado, as  
88 poáceas produzem maiores quantidades de raízes, com ampla distribuição de exudatos e  
89 enzimas, que incrementam a agregação do solo e as adições de C acima de 0,71 Mg C ano<sup>-1</sup>  
90 (Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Six et al., 2004; Calegari et al., 2008; Martins et al., 2012a).  
91 Alguns autores consideram que as raízes são mais efetivas em acumular C ao solo, em  
92 comparação a biomassa da parte aérea, por se desenvolverem entre os agregados do solo e

93 adicionar C já protegido intragregado após a senescência das raízes (Six et al., 2002; Six et  
94 al., 2004; Bayer et al., 2011). Entretanto, o efeito das plantas sobre a agregação e os  
95 conteúdos de C e N nos Latossolos ainda é pouco conhecido (Martins et al., 2013)

96 Sabe-se que o acúmulo de C e N no solo depende da sua estabilização química e da  
97 recalitrância bioquímica dos resíduos (Jastrow et al., 1998; Six et al., 2002; Diekow et al.,  
98 2009; Conceição et al., 2013). A recalitrância dos resíduos exerce a menor influência sobre a  
99 estabilização do C no solo (Diekow et al., 2009), entretanto, a estabilização química se  
100 destaca nos Latossolos devido à forte interação entre as macromoléculas orgânicas com os  
101 óxidos de Fe, Al e Mn (von Lützow et al., 2006; Six et al., 2004).

102 A adição de C e N ao solo está diretamente correlacionada com a agregação do solo,  
103 da mesma maneira que a formação de agregados favorece o acúmulo de C no solo; assim, o  
104 acúmulo de C e a agregação do solo são interdependentes (Tisdall & Oades, 1982; Bayer et  
105 al., 2000; Diekow et al., 2005; Zotarelli et al., 2007; Martins et al., 2009). Portanto, é  
106 fundamental avaliar a dinâmica do C e N, por meio de técnicas de fracionamento físico, para  
107 verificar seus efeitos sobre a agregação do solo (Diekow et al., 2005).

108 O fracionamento físico consiste da separação do C, conforme seu tamanho, em: C  
109 orgânico particulado médio (COP-M), com tamanho entre 250 – 2000  $\mu\text{m}$ ; C orgânico  
110 particulado de tamanho fino (COP-F), entre 53 – 250  $\mu\text{m}$ ; e, C associado às partículas  
111 minerais do solo (COAM), com tamanho < 53  $\mu\text{m}$  (Koutika et al., 2001). As frações COP-M  
112 e COP-F são as mais ativas e as mais sensíveis aos sistemas de manejo (Diekow et al., 2005;  
113 Conceição et al., 2013) porém, representam apenas uma pequena parte do C nos Latossolos,  
114 uma vez que, a maior parte e a mais recalitrante, se encontra na fração COAM (Lal, 2005). O  
115 C contido na fração COAM é muito importante para o sequestro de C e para a qualidade  
116 estrutural dos Latossolos (Parfitt et al., 1997), uma vez que, apresenta forte afinidade com os  
117 óxidos de Fe e Al para a formação de microagregados do tamanho de grãos simples de silte  
118 (Tisdall & Oades, 1982; Six et al., 2002), que, se unem e dão origem à microagregados  
119 estáveis, com tamanho < 250  $\mu\text{m}$ , ricos em C e, considerados os principais responsáveis pelo  
120 sequestro de C nos Latossolos (Conceição et al., 2013; Tisdall & Oades, 1982). Os  
121 microagregados são unidos pelas raízes, hifas de fungos e polissacarídeos e formam os  
122 macroagregados do solo (> 250  $\mu\text{m}$ ), que são menos estáveis e mais sensíveis aos efeitos dos  
123 sistemas de manejo (Tisdall & Oades, 1982). Em contrapartida, os macroagregados também  
124 se formam ao redor de resíduos vegetais frescos que após a senescência se transformam em

125 COP-M, protegido intragregado (Six et al., 2000; Lal, 2005). Dentro dos macroagregados,  
126 parte do COP-M se fragmenta em estruturas menores, originando o COP-F que se une às  
127 partículas minerais do solo para formar os microagregados (Tisdall & Oades, 1982).

128 Com base no exposto, a hipótese deste estudo foi que as sequências de culturas sob  
129 SSD alteram o conteúdo e a distribuição do C e N nas frações COP-M, COP-F e COAM e isto  
130 influencia a agregação do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito das sequências de  
131 culturas em SSD sobre o conteúdo de C e N total e as frações COP-M, COP-F e COAM e  
132 verificar a influência do C e do N sobre a agregação do solo.

133

134

## 135 MATERIAL E MÉTODOS

136

137 O presente estudo foi realizado em Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21° 14' S,  
138 48° 17' W, altitude de 550 m). O clima é classificado como tropical do tipo Aw segundo a  
139 classificação de Köppen. A precipitação anual (média de 30 anos) é de 1430 mm, concentrada  
140 entre os meses de outubro e março, com temperatura média de 22 °C. O solo da área  
141 experimental é um Latossolo Vermelho eutrófico, textura argilosa (Embrapa, 2006), com  
142 556 g kg<sup>-1</sup> de argila, 63 g kg<sup>-1</sup> de silte e 381 g kg<sup>-1</sup> de areia determinados na camada de 0 -  
143 10 cm de profundidade.

144 O presente estudo fez parte de um experimento de longa duração implantado em 2002.  
145 O experimento foi instalado seguindo o delineamento em blocos casualizados, em faixas, com  
146 três repetições. Os tratamentos envolveram três sequências de culturas de verão: soja/soja  
147 (*Glycine max* (L.) Merrill) (SS); milho/milho (*Zea mays* L.) (MM); e, soja/milho (SM), e sete  
148 culturas de inverno: milho, girassol (*Helianthus annuus* L.), nabo forrageiro (*Raphanus*  
149 *sativus* L.), milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.)  
150 Millsp.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária (*Crotalaria juncea* L.). Cada uma  
151 das 63 parcelas tem 40 m de largura por 15 m de comprimento, as quais foram cultivadas com  
152 a mesma sequência de culturas desde a implantação do experimento até o presente estudo.

153 A amostragem de solo foi realizada em outubro de 2011. Em cada parcela foram  
154 coletadas, aleatoriamente, 20 amostras de solo deformadas, para fins de obter uma amostra  
155 composta representativa. Essa amostra foi dividida em duas porções: a primeira foi utilizada  
156 para a separação de agregados do solo com tamanhos entre 6,30 e 4,00 mm, utilizando a

157 amostra com a mesma umidade a qual foi coletada no campo e, em seguida os agregados  
 158 foram secos ao ar (20 °C); e a segunda parte da amostra foi seca ao ar por 48 h e passada em  
 159 de uma peneira com abertura de malha de 2,00 mm (TFSA).

160 A distribuição dos agregados foi realizada pelo método da estabilidade dos agregados  
 161 em água (Nimmo & Perkins, 2002) utilizando um aparelho de oscilação vertical em água  
 162 desenvolvido por Yoder (Yoder, 1936). Uma amostra de 25 g de agregados foi colocada sobre  
 163 um conjunto de peneiras, em ordem decrescente de tamanho (2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e  
 164 0,125 mm) e diretamente imersos em água. Foram quantificados os agregados retidos em cada  
 165 uma das peneiras após secagem a 105 °C. Considerando que os grãos simples de areia não são  
 166 agregados foi realizada a correção de areia nos agregados retidos nas peneiras com abertura  
 167 de malha menores que 0,50 mm (Kemper & Rosenau, 1986). Utilizando os dados de umidade,  
 168 massa de agregados retidos nas peneiras e a quantidade de areia, foi determinado o diâmetro  
 169 médio ponderado dos agregados do solo (DMP):

170

$$DMP = \sum_{i=1}^6 (XiWi)$$

171 Onde:  $Wi$ : é a massa dos agregados retida nas peneiras de diâmetro  $Xi$ .

172

173 A TFSA foi utilizada para a determinação do conteúdo de C e N em amostras  
 174 fracionadas fisicamente (Cambardella & Elliott, 1992). Para tal, 30 g de TFSA foram  
 175 colocados em garrafas plásticas, juntamente com 200 mL de uma solução de hexametáfosfato  
 176 de sódio a uma concentração de 5 g L<sup>-1</sup>, para causar a dispersão química, e três bolas de vidro  
 177 de 5 mm de diâmetro, para auxiliar a dispersão física. A suspensão foi agitada por 16 h em um  
 178 agitador horizontal a 50 rpm e despejada sobre peneiras com abertura de malhas de 250 e  
 179 53 µm. A fração retida na peneira de 250 µm foi denominada de C orgânico particulado  
 180 médio (COP-M), a fração retida na peneira de 53 µm foi denominada de C orgânico  
 181 particulado fino (COP-F) e a fração < 53 µm foi denominada de C orgânico associado aos  
 182 minerais (COAM) conforme Koutika et al. (2001). Na TFSA e nas frações COP-M, COP-F e  
 183 COAM foram determinados os conteúdos de C e N, pelo método da combustão seca a 900 °C  
 184 (Nelson & Sommers, 1982), utilizando uma alíquota entre 275 e 300 mg com tamanho  
 185 < 105 µm. O conteúdo total de C e N foi calculado pela soma dos conteúdos determinados nas  
 186 frações. A taxa de sequestro de C no solo foi calculada pela diferença entre o conteúdo total

187 de C determinado no presente estudo e o conteúdo determinado anterior à adoção do  
188 experimento, igual a 11,02 g kg<sup>-1</sup> (Corá, 2006).

189 Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (Teste F) a 5 % de  
190 probabilidade e, quando significativas, as médias foram submetidas ao teste Tukey ( $\alpha < 0,05$ ).  
191 O conteúdo total de C e o C determinado nas frações COP-M, COP-F e COAM foram  
192 submetidos à correlação de Pearson ( $\alpha < 0,05$ ) com o conteúdo total de N e com o DMP.

193

194

## 195 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

196

197 O conteúdo de C e N total, determinados nas amostras de solo não fracionadas,  
198 apresentaram interação significativa entre as sequências de culturas de verão e as culturas de  
199 inverno (Tabela 1). Os menores conteúdos de C e N determinados no solo sob a sequência de  
200 verão MM foram observados nas parcelas cultivadas com milho, sorgo e girassol (Tabela 2) e  
201 resultados que podem ser atribuídos a maior recalcitrância dos resíduos destas plantas, que  
202 são conduzidas até a colheita dos grãos, além de exportar N, em média: 40,85, 44,90 e 37,10  
203 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Marcelo et al., 2012a,b). Por outro lado, as fabáceas feijão guandu e  
204 crotalária proporcionaram ao solo os maiores conteúdos de C e N. Os resíduos das fabáceas  
205 além de adicionarem C fotossintetizado adicionam grandes quantidades de N fixado  
206 simbioticamente. Estudos realizados na mesma área relataram que o guandu e a crotalária  
207 fixaram em torno de 23,5 e 19,5 g kg<sup>-1</sup> de N na sua biomassa (Marcelo et al., 2012a). A maior  
208 parte do N fixado na biomassa é adicionado ao solo como N orgânico (~55 %) e outra parte  
209 (~ 15 %) é rapidamente mineralizada e prontamente disponibilizada à cultura subsequente não  
210 leguminosa (Seo et al., 2006), suprimindo a demanda de N pela cultura sub produtora de grãos  
211 (Urquiaga et al., 2010) e contribuindo para o acúmulo de C e N fotossintetizado (Bayer &  
212 Mielniczuk, 2008).

213 Na sequência de cultura de verão SS os maiores conteúdos de C e de N foram  
214 verificados no solo cultivado com o milho e os menores conteúdos sob nabo forrageiro  
215 (Tabela 2). Os maiores conteúdos de C e N no solo podem ser atribuídos à disponibilidade de  
216 N pelos resíduos de milho à cultura da soja no verão e vice-versa. O milho apresenta as  
217 maiores quantidades de resíduos remanescentes (2,7 Mg ha<sup>-1</sup>), contendo as maiores  
218 quantidades de N (13,1 kg N ha<sup>-1</sup>), enquanto que, o nabo forrageiro apresenta as menores

219 quantidades de resíduos ( $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), com as menores quantidades de N ( $0,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ )  
220 devido a maior labilidade dos resíduos e ao maior período entre o corte das plantas e o plantio  
221 da soja, em torno de 180 dias (Marcelo et al., 2012b). Considerando que, os maiores  
222 conteúdos de  $\text{NO}_3^-$ , forma do N assimilado pelas plantas, são disponibilizados pelos resíduos  
223 de nabo forrageiro aos 54 dias após o corte das plantas (Heinzmann, 1985), o nabo pouco  
224 contribui para a disponibilização de N à soja. Por outro lado, a lenta decomposição dos  
225 resíduos de milho e a liberação de  $\text{NO}_3^-$  coincidem com o período de desenvolvimento da  
226 soja.

227 Da mesma maneira, nas parcelas cultivadas com milho no inverno os maiores  
228 conteúdos de C e N foram determinados sob a sequência de verão SS em comparação ao MM.  
229 A cultura da soja, mesmo produzindo menores quantidades de resíduos em comparação ao  
230 milho, incrementa em 46 % o conteúdo de C do solo sob SSD de longa duração (Amado et  
231 al., 2006), devido à rápida decomposição dos resíduos da soja e a disponibilização de  
232 nutrientes às culturas de inverno (Dayegamiye et al., 2012; Aita et al., 2001), dispensando a  
233 necessidade de fertilização (Weber & Mielniczuk, 2009; Bohlool et al., 1992). O acúmulo de  
234 N pelas fabáceas de verão pode ser superior às de inverno (Weber & Mielniczuk, 2009; Aita  
235 et al., 2001).

236 O fracionamento físico do solo mostrou que os maiores conteúdos de C e N foram  
237 determinados na fração COAM, seguido pela fração COP-F e COP-M (Figura 1). Os maiores  
238 conteúdos de C e N na fração COAM mostram a forte interação organomineral. Neste caso, a  
239 textura, a mineralogia e a temperatura do solo estão atuando como os principais mecanismos  
240 de estabilização do C e N no solo estudado (Zinn et al., 2007), corroborando com outros  
241 estudos conduzidos em Latossolos (Martins et al., 2012b; Campos et al., 2011; Bayer et al.,  
242 2009; Zotarelli et al., 2007).

243 Nas frações COP-F e COAM não houveram diferenças entre os tratamentos para os  
244 conteúdos de C e N (Tabela 1). O COAM representa a matéria orgânica com alta estabilidade  
245 química, por estar associada às superfícies dos minerais e óxidos nos Latossolos e, portanto, é  
246 pouco influenciada pelo manejo do solo (Oades et al., 1989). Entretanto, a sequência de verão  
247 SS incrementou os conteúdos de C e N na fração COP-M. A soja, por apresentar resíduos  
248 mais lábeis (Marcelo et al., 2012b; Henderson et al., 2010), adiciona com maior rapidez  
249 material orgânico, com baixa relação C:N e rico em C e N, à fração COP-M em comparação  
250 ao milho. A menor relação C:N indica que o material orgânico adicionado pela soja à fração

251 COP-M é mais susceptível a degradação e proporciona a formação de estruturas orgânicas  
252 mais recalcitrantes (maior relação C:N) na fração COAM. O constante aporte de resíduos ao  
253 solo sob SSD é essencial para à adição de C na fração COP (Campos et al., 2011; Sá & Lal,  
254 2009), de onde ocorre a migração de C para a fração COAM (Briedis et al., 2012), que é o  
255 principal compartimento de C nos Latossolos (Martins et al., 2012b; Campos et al., 2011). Os  
256 produtos da decomposição do COP são mais recalcitrantes e atuam na formação dos  
257 microagregados que estabilizam o C no solo (Conceição et al., 2013; Briedis et al., 2012; Six  
258 et al., 2002; Tisdall & Oades, 1982).

259 As maiores taxas de sequestro de C no solo, entre as culturas de verão, foi  
260 proporcionado pela soja (SS e SM) em comparação ao MM e entre as culturas de inverno a  
261 crotalária apresentou o maior sequestro de C em comparação ao nabo forrageiro (Tabela 1).  
262 Estes resultados enfatizam a importância da rápida adição de COP pelas fabáceas e de grandes  
263 quantidades de N. A adição de N ao solo por fabáceas contribui para o sequestro de C nos  
264 Latossolos tropicais (Martins et al., 2012b) e o efeito da crotalária é devido aos resíduos com  
265 baixa relação C:N (23) e com as maiores quantidades de N acumulado ( $110,1 \text{ g kg}^{-1}$ ), liberado  
266 ( $89,0 \text{ g kg}^{-1}$ ) e remanescentes ( $21,1 \text{ g kg}^{-1}$ ) no solo (Marcelo et al., 2012b). A taxa média de  
267 sequestro de C entre as sequências de culturas de verão e de inverno, determinadas neste  
268 estudo, foram de  $0,63 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , superiores à  $0,35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , determinada por  
269 Bayer et al. (2006) e inferiores à  $0,89 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  determinada por Sá et al. (2013), ambas,  
270 avaliadas em Latossolos sob sequências de culturas em SSD em regiões de clima tropical.

271 O cultivo de milho no verão (SM) proporcionou os maiores valores de DMP dos  
272 agregados do solo em comparação ao SS e entre as culturas de inverno o sorgo proporcionou  
273 o maior DMP em comparação ao milho, girassol, nabo e feijão guandu (Tabela 1). As raízes  
274 das poáceas contribuem fisicamente para a aproximação das partículas do solo e,  
275 quimicamente pela liberação uniforme de exudatos no solo. Além disso, as raízes das poáceas,  
276 por apresentarem alta densidade e constantes renovações, atuam como núcleo formador de  
277 macroagregados do solo (Silva & Mielniczuk, 1997; Six et al., 2002). Estes resultados  
278 corroboram com outros estudos prévios realizados na mesma área experimental, em que as  
279 poáceas incrementaram a agregação do solo pela adição de C e de polissacarídeos facilmente  
280 hidrolisáveis (Martins et al., 2009). Entretanto, resultados mais recentes mostraram que o  
281 conteúdo total de C não incrementou a agregação do solo que foi afetada, indiretamente, pela  
282 adição de maiores quantidades de polissacarídeos e de pentoses, principalmente as arabinoses

283 e as xiloses, que servem de energia para filamentos de microrganismos que atuam sobre a  
284 agregação do solo (Martins et al., 2012a; Martins et al., 2013).

285 O DMP apresentou correlação positiva ( $r = 0,32$ ) com o conteúdo de C determinado  
286 na fração COP-F (Figura 2A). O COP-F é um dos agentes cimentantes dos microagregados  
287 nos Latossolos (Sá & Lal, 2009; Deneff et al., 2004), porém, a baixa correlação com o DMP  
288 indica que, provavelmente, os principais agentes formadores dos microagregados foram os  
289 óxi-hidróxidos de Fe e Al. Embora a correlação seja baixa, a formação de microagregados no  
290 solo sob SSD é fundamental para a proteção do COP e a estabilização de C no solo (Six et al.,  
291 2002).

292 O conteúdo total de C do solo foi positivamente correlacionado ( $r = 0,94$ ) com o  
293 conteúdo total de N (Figura 2B). A adição de N favorece o acúmulo de C por proporcionar o  
294 aumento da atividade microbiana e a produtividade de biomassa da cultura subsequente. O N  
295 adicionado ao solo pelas fabáceas, via fixação biológica, favorece o desenvolvimento da  
296 cultura subsequente (Boddey et al., 2010; Conceição et al., 2013) e é mais efetivo em  
297 incrementar o C do solo do que o N adicionado via fertilização mineral (Conceição et al.,  
298 2013; Bayer et al., 2009; Lovato et al., 2004), devido a preferência na assimilação pelos  
299 microrganismos do solo (MORAN et al., 2005).

300 O conteúdo total de C no solo também foi positivamente correlacionado com o  
301 conteúdo de C determinado nas frações COP-M ( $r = 0,41$ ) e COP-F ( $r = 0,36$ ) (Figuras 2C e  
302 2D). A correlação entre o COP com o conteúdo total de C no solo se deve a contínua adição  
303 de resíduos à superfície do solo sob SSD. O acúmulo de C em solos sob SSD ocorre  
304 preferencialmente na fração COP protegida no interior dos agregados do solo (Bayer et al.,  
305 2004). Estudos anteriores realizados no mesmo local, relataram forte correlação entre o COP  
306 e o conteúdo total de C ( $r = 0,90$ ), a qual foi atribuída à qualidade dos resíduos, uma vez que,  
307 a quantidade não explicou as variações nos conteúdos de C na COP e conteúdo total (Martins  
308 et al., 2012b).

309 Os resultados deste estudo enfatizam os benefícios do cultivo das fabáceas soja no  
310 verão e do guandu e da crotalária no inverno para a adição de C e N no solo e, das poáceas  
311 milho no verão e sorgo no inverno, as quais incrementaram a agregação do solo, embora, a  
312 agregação tenha contribuído pouco para a estabilização de C no solo e esteve fortemente  
313 associada aos minerais e óxidos do solo.

314

315

**316 CONCLUSÕES**

317

318 A soja cultivada no verão proporciona maiores estoques de carbono orgânico em  
319 comparação ao milho e, a crotalária, entre as culturas de inverno, em comparação ao nabo  
320 forrageiro.

321 Mais de 50 % do conteúdo de carbono e de nitrogênio estão contidos na fração  
322 carbono orgânico associado aos minerais.

323 O estoque de carbono do solo é influenciado pelo carbono orgânico particulado e pelo  
324 teor de nitrogênio no solo.

325 O diâmetro médio ponderado dos agregados do solo apresenta correlação com o  
326 carbono orgânico particulado de tamanho fino e é maior no solo sob a rotação soja/milho em  
327 comparação ao soja/soja e no solo sob sorgo em comparação ao milho, girassol, nabo e feijão  
328 guandu cultivadas no inverno.

329

330

**331 AGRADECIMENTOS**

332

333 À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela  
334 concessão de bolsa de estudos ao primeiro autor (Processo 8745/11-0). Ao Professor Dr. João  
335 Carlos de Moraes Sá, ao pesquisador Dr. Florent Tivet e a professora Dra. Carolina Fernandes  
336 pelas preciosas sugestões. À The Ohio State University por ter cedido o laboratório para  
337 realização das análises.

338

339

**340 LITERATURA CITADA**

341

342 ABDALA, D.B.; GHOSH, A.K.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F. & VENEGAS, V.H.A.  
343 Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter  
344 addition. Agriculture, Ecos. Environ., 162, 15-23, 2012.

- 345 AITA, C.; BASSO, C.J.; CERETTA, C.A.; GONÇALVES, C.N. & DA ROS, C.O. Plantas de  
346 cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. R. Bras. Ci. Solo, 25:157-165.  
347 2001.
- 348 AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B.C. &  
349 VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and  
350 cover crops in southern Brazil. J. Environ. Qual., 35, 599-607, 2006.
- 351 ANGERS, D.A. & CARON, J. Plant-induced changes in soil structure: processes and  
352 feedbacks. In: van BREEMEN, N. ed. Plant-induced soil changes: Processes and  
353 feedbacks. Netherlands, Springer, 1998. p.55-72.
- 354 BAYER, C.; AMADO, T.J.C.; TORNQUIST, C.G.; CERRI, C.E.P.; DIECKOW, J.;  
355 ZANATTA, J.A. & NICOLOSO, R.S. Estabilização do carbono no solo e mitigação  
356 das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In:  
357 KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A.L. & GATIBONI, L.C., ed. Tópicos em  
358 ciência do solo. Viçosa, 2011. p.55-118.
- 359 BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de  
360 carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob  
361 plantio direto. Pesq. Agrop. Bras., 39:677-683, 2004.
- 362 BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIEKOW, J.  
363 Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. Soil Till. Res.,  
364 86:237-245, 2006.
- 365 BAYER, C.; MIELNICZUCK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES,  
366 S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and  
367 cropping systems in southern Brazil. Soil Till. Res. 54:101-109, 2000.
- 368 BAYER, C.; DIECKOW, J.; AMADO, T.J.C.; ELTZ, F.L.F.; VIEIRA, F.C.B. Cover crop  
369 effects increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. Commun.  
370 Soil Sci. Plant Anal., 40:1499-1511, 2009.
- 371 BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS,  
372 G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O. ed. Fundamentos da  
373 matéria orgânica do solo em ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto  
374 Alegre, Metrópole, 2008. p.7-18.
- 375 BODDEY, R.M; JANTALIA, C.P.; CONCEICAO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.;  
376 MIELNICZUK, J; DIEKOW, J.; SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.;

- 377 GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R. & URQUIAGA, S. Carbon accumulation at  
378 depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture *Glob. Chan. Biol.*, 16:784-  
379 795, 2010.
- 380 BOHLOOL, B.B.; LADHA, J.K.; GARRITY, D.P. & GEORGE, T. Biological nitrogen  
381 fixation for sustainable agriculture: A perspective. *Plant Soil*, 141:1-11, 1992.
- 382 BRIEDIS, C.; SÁ, J.C.M.; CAIRES, E.F.; NAVARRO, J.F.; INAGAKI, T.M.; BOER, A.;  
383 FERREIRA, A.O.; NETO, C.Q.; CANALLI, L.B. & SANTOS, J.B. Changes in  
384 Organic Matter Pools and Increases in Carbon Sequestration in Response to Surface  
385 Liming in an Oxisol under Long-Term No-Till. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76:151-160,  
386 2012.
- 387 CALEGARI, A; HARGROVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALISCH, R.; TESSIER, D.;  
388 TOURDONNET, S. & GUIMARÃES, M.F. Impact of long-term no-tillage and  
389 cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for  
390 sustainability. *Agron. J.*, 100:1013-1020, 2008.
- 391 CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a  
392 Grassland Cultivation Sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:777-783, 1992.
- 393 CAMPOS, B.H.C.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R.S. & FIORIN, J.E. Carbon  
394 stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop  
395 rotation systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:805-817, 2011.
- 396 CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de  
397 latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*,  
398 14:99-105, 1990.
- 399 CONCEIÇÃO, P.C.; DIEKOW, J. & BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping  
400 systems in soil carbon stocks and stabilization. *Soil Till. Res.*, 129:40-47, 2013.
- 401 CORÁ, J.E. Sistema de semeadura direta na região do município de Jaboticabal, SP: Efeitos  
402 em atributos do solo e produtividade de culturas. Jaboticabal, Universidade Estadual  
403 Paulista, 2006. 87p. (Tese de Livre Docência)
- 404 DAYEGAMIYE, A.N.; NYIRANEZA, J.; WHALEN, J.K.; GRENIER, M. & DRAPEAU, A.  
405 Growing Soybean Prior to Corn Increased Soil Nitrogen Supply and N Fertilizer  
406 Efficiency for Corn in Cold and Humid Conditions of Eastern Canada. *Sust. Agric.*  
407 *Res.*, 1:257-267, 2012.

- 408 DENEFF, K.; SIX, J.; MERCKX, R. & PAUSTIAN, K. Carbon sequestration in  
409 microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am.*  
410 *J.*, 68:1935-1944, 2004.
- 411 DIEKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; MARTIN-NETO, L.;  
412 MILORI, D.B.M.; SALTON, J.C.; MACEDO, M.M.; MIELNICZUK, J. &  
413 HERNANI, L.C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition  
414 in tropical and subtropical Brazilian soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 60:240-249, 2009.
- 415 DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-  
416 KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical  
417 Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. *Plant*  
418 *Soil*, 268:319-328, 2005.
- 419 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro  
420 Nacional de Pesquisa em Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed.  
421 Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- 422 GUO, L.B. & GIFFORD, R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis.  
423 *Glob. Chan. Biol.*, 8:345-360, 2002.
- 424 HEINZMANN, F.X. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas  
425 de inverno. *Pesq. Agropec. Bras.*, 20:1021-1030, 1985.
- 426 HENDERSON, S.L.; DANDIE, C.E.; PATTEN, C.L.; ZEBARTH, B.J.; BURTON, D.L.;  
427 TREVORS, J.T. & GOYER, C. Changes in denitrifier abundance, denitrification  
428 gene mRNA levels, nitrous oxide emissions, and denitrification in anoxic soil  
429 microcosms amended with glucose and plant residues. *Appl. Environ. Microb.* 76,  
430 2155-64, 2010.
- 431 JASTROW, J.D.; MILLER, R.M. & LUSSENHOP, J. Contributions of interacting biological  
432 mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biol. Biochem.*,  
433 30:905-916, 1998.
- 434 KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate Stability and Size Distributon. In: KLUTE,  
435 A. ed. *Methods of Soil Analisis: Physical and Mineralogical Methods*. Madison,  
436 ASA-SSSA, 1986. p.425-442.
- 437 KOUTIKA, L.S.; HAUSER, S. & HENROT, J. Soil organic matter assessment in natural  
438 regrowth, *Pueraria phaseoloides* and *Mucuna pruriens* fallow. *Soil Biol. Biochem.*,  
439 33:1095-1101, 2001.

- 440 LAL, R. Soil carbon sequestration for sustaining agricultural production and improving the  
441 environment with particular reference to Brazil. *J. Sust. Agric.*, 26:23-42, 2005.
- 442 LAL, R. Climate change mitigation by managing the terrestrial biosphere. Recarbonization of  
443 the Biosphere. Netherlands, Springer, 2012. p.17-39.
- 444 LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. & VEZZANI, F. Adição de carbono e  
445 nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em  
446 sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:175-187, 2004.
- 447 MARCELO, A. V.; CORÁ, J.E. & FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de  
448 semeadura direta. I - Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. *Rev. Bras.  
449 Cien. Solo*, 36:1553-1567, 2012a.
- 450 MARCELO, A. V.; CORÁ, J.E. & FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de  
451 semeadura direta. II - Decomposição e liberação de nutrientes na entressafra. *Rev.  
452 Bras. Cien. Solo*, 36:1568-1582, 2012b.
- 453 MARCELO, A. V.; CORÁ, J.E.; FERNANDES, C.; MARTINS, M.R. & JORGE, R.F. Crop  
454 sequences in no-tillage system: Effects on soil fertility and soybean, maize and rice  
455 yield. *Rev. Bras. Cien. Solo*, 33:417-428, 2009.
- 456 MARTINS, M.R.; ANGERS, D.A. & CORÁ, J.E. Co-accumulation of microbial residues and  
457 particulate organic matter in the surface layer of a no-till Oxisol under different  
458 crops. *Soil Biol. Bioch.*, 50:208-213, 2012b.
- 459 MARTINS, M.D.R.; ANGERS, D.A. & CORÁ, J.E. Carbohydrate composition and water-  
460 stable aggregation of an Oxisol as affected by crop sequence under no-till. *Soil Sci.  
461 Soc. Am. J.*, 76:475-484, 2012a.
- 462 MARTINS, M.D.R.; ANGERS, D.A. & CORÁ, J.E. Non-labile plant C contributes to long-  
463 lasting macroaggregation of an Oxisol. *Soil Biol. Bioch.*, 58:153-158, 2013.
- 464 MARTINS, M.R.; CORA, J.E.; JORGE, R.F. & MARCELO, A.V. Crop type influences soil  
465 aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil Till. Res.*, 104:22-29, 2009.
- 466 MORAN, K.K.; SIX, J.; HORWATH, W.R.; van KESSEL, C. Role of mineral-nitrogen in  
467 residue decomposition and stable soil organic matter formation. *Soil Sci. Soc. Am.  
468 J.*, 69:1730-1736, 2005.
- 469 NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In:  
470 PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R. ed. *Methods of Soil Analysis:  
471 Chemical and Microbiological Properties*. Madison, ASA-SSSA, 1982. p.539-579.

- 472 NIMMO, J.R. & PERKINS, K.S. Aggregate Stability and Size Distribution. In: DANE, J.H.  
473 & TOPP, G.C. ed. *Methods of Soil Analysis: Physical Methods*. Madison, SSSA,  
474 2002. p.317-328.
- 475 OADES, J.M.; GILLMAN, G.P.; UEHARA, G.; HUE, N.V.; van NOORDWIJK, M.;  
476 ROBERTSON, G.P. & WADA, K. Interactions of soil organic matter and variable-  
477 charge clays. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M. & UEHARA, G., ed. *Dynamics*  
478 *of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu, University of Hawaii Press,  
479 1989. p.69-95.
- 480 PARFITT, R.L.; THENG, B.K.G., WHITTON, J.S. & SHEPHERD, T.G. Effects of clay  
481 minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, 75:1-12, 1997.
- 482 SÁ, J.C.D.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE, S.P.; PICCOLO, M.C. &  
483 FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage  
484 chron-osequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1486–1499, 2001.
- 485 SÁ, J.C.M & LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of  
486 carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till.*  
487 *Res.*, 103:46–56. 2009.
- 488 SÁ, J.C.M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P.R.;  
489 BRIEDIS, C.; SANTOS, J.B.; HARTMAN, D.C.; BERTOLONI, C.G.; ROSA, J. &  
490 FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping  
491 systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. *Land*  
492 *Degrad. Develop.*, 2013.
- 493 SÁNCHEZ, P. & SALINAS, J.G. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in  
494 tropical America. *Adv. Agron.* 34: 279–405, 1983.
- 495 SEO J.H.; MEISINGER J.J.; LEE H.J. Recovery of nitrogen-15-labeled hairy vetch and  
496 fertilizer applied to corn, *Agron. J.*, 98, 245–254, 2006.
- 497 SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e  
498 estabilização de agregados de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:113-117, 1997.
- 499 SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.D. & Albrecht, A. Soil organic  
500 matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage.  
501 *Agronomie* 22:755–775, 2002.

- 502 SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S. & DENEFF, K. A history of research on the link  
503 between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till.  
504 Res.*, 79:7-31, 2004.
- 505 SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T. & COMBRINK, C. Soil structure and organic  
506 matter: I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil  
507 Sci. Soc. Am. J.*, 64:681–689, 2000.
- 508 TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. *J. Soil  
509 Sci.*, 33:141-163, 1982.
- 510 URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P. & BODDEY, R.M. Variações nos  
511 estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões  
512 tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. *Inf. Agron.*, 130:12-21, 2010.
- 513 von LÜTZOW, M.; KOGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.;  
514 GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B. & FLESSA, H. Stabilization of organic  
515 matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil  
516 conditions – a review. *Eur. J. Soil Sci.*, 57:426–445, 2006.
- 517 WEBER, M. A. & MIELNICZUK, J. Estoque e disponibilidade de nitrogênio no solo em  
518 experimento de longa duração. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:429-437, 2009.
- 519 YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical  
520 nature of erosion losses. *Agronomie J.*, 28:337-351, 1936.
- 521 ZINN, Y.L.; LAL, R; BIGHAM, J.M. & RESCK, D.V.S. Edaphic controls on soil organic  
522 carbon retention in the Brazilian Cerrado: Soil structure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*,  
523 71:1215-1224, 2007.
- 524 ZOTARELLI, L.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; SIX, J. Impact of  
525 tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in  
526 two Oxisols. *Soil Till. Res.*, 95:196-206, 2007.

Tabela 1. Conteúdo de carbono (C) e de nitrogênio (N) e relação C:N determinados em amostras não fracionadas (TFSA) e nas frações C orgânico particulado médio (COP-M) e fino (COP-F) e C orgânico associado aos minerais (COAM), taxa de sequestro de C (Tx C) e diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) de um Latossolo Vermelho sob sequências de culturas em sistema de semeadura direta.

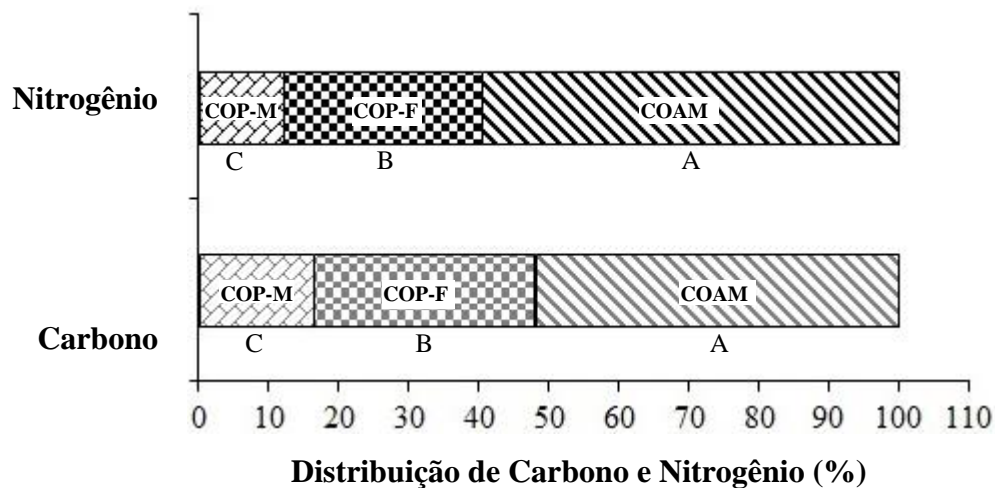
| Sequências de Culturas de Verão (V) | TFSA                          |                    |                    | COP-M              |                    |                    | COP-F              |                    |                     | COAM               |                    |                      | Taxa de Sequestro de C<br>Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> | DMP<br>...mm....   |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---|--------------------|
|                                     | C                             | N                  | C:N                | C                  | N                  | C:N                | C                  | N                  | C:N                 | C                  | N                  | C:N                  |   |                    |
|                                     | .....g kg <sup>-1</sup> ..... |                    |                    | .....%.....        |                    |                    | .....%.....        |                    |                     | .....%.....        |                    |                      |   |                    |
| Soja/Milho                          | 17,66 a                       | 1,51 a             | 11,70 a            | 16,74 ab           | 11,75 ab           | 18,05 ab           | 32,52 a            | 29,65 a            | 13,74 a             | 50,74 a            | 58,60 ab           | 10,82 a              | 0,68 a  | 2,99 a             |
| Milho/Milho                         | 16,23 b                       | 1,40 a             | 11,59 a            | 13,72 b            | 9,71 b             | 18,92 a            | 29,92 a            | 26,67 a            | 13,93 a             | 56,35 a            | 63,62 a            | 11,23 a              | 0,53 b  | 2,94 ab            |
| Soja/Soja                           | 17,72 a                       | 1,51 a             | 11,74 a            | 19,18 a            | 14,60 a            | 13,21 b            | 32,15 a            | 29,77 a            | 10,72 a             | 48,67 a            | 55,62 a            | 15,59 a              | 0,69 a  | 2,80 b             |
| Teste F                             | 6,25*                         | 2,73 <sup>ns</sup> | 0,01 <sup>ns</sup> | 11,21*             | 11,10*             | 5,81*              | 1,17 <sup>ns</sup> | 1,97 <sup>ns</sup> | 67,80 <sup>ns</sup> | 4,41 <sup>ns</sup> | 5,06 <sup>ns</sup> | 136,91 <sup>ns</sup> | 6,38*   | 8,09*              |
| CV(%)                               | 9,0                           | 12,9               | 4,0                | 22,6               | 28,1               | 35,0               | 18,9               | 20,0               | 7,8                 | 16,7               | 13,9               | 8,3                  | 24,7  | 23,6               |
| <b>Culturas de Inverno (I)</b>      |                               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                     |                    |                    |                      |   |                    |
| Milho                               | 16,89 ab                      | 1,46 a             | 11,57 a            | 16,05 a            | 11,53 a            | 16,73 a            | 30,53 a            | 27,48 a            | 13,01 a             | 53,42 a            | 61,00 a            | 12,87 a              | 0,60 ab   | 2,58 b             |
| Girassol                            | 16,60 ab                      | 1,41 a             | 11,77 a            | 16,45 a            | 11,70 a            | 16,54 a            | 30,02 a            | 27,32 a            | 12,99 a             | 53,53 a            | 60,98 a            | 12,52 a              | 0,57 ab   | 1,95 b             |
| Nabo Forrageiro                     | 16,33 b                       | 1,39 a             | 11,75 a            | 15,17 a            | 10,60 a            | 16,88 a            | 30,87 a            | 28,59 a            | 12,39 a             | 53,96 a            | 60,81 a            | 12,40 a              | 0,54 b  | 2,46 b             |
| Milheto                             | 16,90 ab                      | 1,48 a             | 11,42 a            | 16,95 a            | 12,47 a            | 16,69 a            | 31,50 a            | 28,80 a            | 12,71 a             | 51,55 a            | 58,73 a            | 12,80 a              | 0,60 ab   | 2,74 ab            |
| Feijão Guandu                       | 17,88 ab                      | 1,51 a             | 11,84 a            | 15,92 a            | 11,67 a            | 16,15 a            | 32,64 a            | 29,53 a            | 12,75 a             | 51,43 a            | 58,79 a            | 12,59 a              | 0,70 ab   | 2,42 b             |
| Sorgo                               | 17,08 ab                      | 1,47 a             | 11,62 a            | 17,78 a            | 13,60 a            | 16,01 a            | 34,18 a            | 30,83 a            | 12,72 a             | 48,05 a            | 55,56 a            | 11,67 a              | 0,62 ab   | 3,35 a             |
| Crotalária                          | 18,73 a                       | 1,61 a             | 11,63 a            | 17,50 a            | 12,57 a            | 18,07 a            | 30,99 a            | 28,35 a            | 13,02 a             | 51,51 a            | 59,08 a            | 12,97 a              | 0,79 a  | 2,74 ab            |
| Teste F                             | 2,48*                         | 2,28 <sup>ns</sup> | 0,52 <sup>ns</sup> | 1,34 <sup>ns</sup> | 1,87 <sup>ns</sup> | 0,80 <sup>ns</sup> | 1,13 <sup>ns</sup> | 0,82 <sup>ns</sup> | 1,67 <sup>ns</sup>  | 1,51 <sup>ns</sup> | 1,36 <sup>ns</sup> | 1,45 <sup>ns</sup>   | 2,49*   | 5,38*              |
| CV (%)                              | 9,2                           | 9,8                | 3,4                | 14,5               | 17,5               | 13,4               | 12,8               | 14,0               | 4,2                 | 9,5                | 8,4                | 8,7                  | 25,4  | 20,9               |
| <b>Interação VxI</b>                |                               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                     |                    |                    |                      |   |                    |
| Teste F                             | 6,11*                         | 3,90*              | 2,86 <sup>ns</sup> | 0,57 <sup>ns</sup> | 0,52 <sup>ns</sup> | 0,91 <sup>ns</sup> | 1,30 <sup>ns</sup> | 1,27 <sup>ns</sup> | 0,91 <sup>ns</sup>  | 0,78 <sup>ns</sup> | 1,01 <sup>ns</sup> | 1,0 <sup>ns</sup>    | 6,21 <sup>ns</sup>  | 0,52 <sup>ns</sup> |
| CV (%)                              | 7,3                           | 8,8                | 2,8                | 22,9               | 27,1               | 14,4               | 11,9               | 13,0               | 5,8                 | 10,3               | 8,5                | 9,7                  | 20,0  | 14,8               |

Médias seguidas pela mesma letra minúsculas não diferem entre si ( $\alpha < 0,05$ ). \* Significante a 5 % de probabilidade; <sup>ns</sup> não significante.

Tabela 2. Conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio e relação C:N determinados em amostras não fracionadas de um Latossolo Vermelho sob sequências de culturas em sistema de semeadura direta.

| Culturas de Inverno                               | Sequências de Culturas de Verão |    |              |     |            |     | Teste F            |
|---|---------------------------------|----|--------------|-----|------------|-----|--------------------|
|   | Soja/Milho                      |    | Milho/ Milho |     | Soja/ Soja |     |                    |
| <b>Conteúdo de carbono (g kg<sup>-1</sup>)</b>    |                                 |    |              |     |            |     |                    |
| Milho   | 18,61                           | Aa | 12,30        | Cb  | 19,75      | Aa  | 28,87*             |
| Girassol  | 18,38                           | Aa | 14,54        | BCa | 16,86      | ABa | 6,71 <sup>ns</sup> |
| Nabo Forrageiro                                   | 16,50                           | Aa | 16,31        | ABa | 16,49      | Ba  | 0,19 <sup>ns</sup> |
| Milheto   | 16,49                           | Aa | 17,02        | ABa | 17,20      | ABa | 0,25 <sup>ns</sup> |
| Feijão Guandu                                     | 16,03                           | Aa | 19,01        | Aa  | 18,60      | ABa | 4,67 <sup>ns</sup> |
| Sorgo   | 18,25                           | Aa | 15,96        | Ba  | 17,69      | ABa | 1,90 <sup>ns</sup> |
| Crotalária  | 18,44                           | Aa | 18,93        | Aa  | 18,48      | ABa | 0,41 <sup>ns</sup> |
| Teste F   | 2,87 <sup>ns</sup>              |    | 9,36*        |     | 2,68*      |     |                    |
| <b>Conteúdo de nitrogênio (g kg<sup>-1</sup>)</b> |                                 |    |              |     |            |     |                    |
| Milho   | 1,57                            | Aa | 1,10         | Cb  | 1,70       | Aa  | 15,25*             |
| Girassol  | 1,53                            | Aa | 1,27         | BCa | 1,43       | CDa | 2,79 <sup>ns</sup> |
| Nabo Forrageiro                                   | 1,40                            | Aa | 1,37         | BCa | 1,40       | Da  | 0,06 <sup>ns</sup> |
| Milheto   | 1,53                            | Aa | 1,50         | ABa | 1,50       | Ca  | 0,23 <sup>ns</sup> |
| Feijão Guandu                                     | 1,63                            | Aa | 1,68         | Aa  | 1,53       | BCa | 2,79 <sup>ns</sup> |
| Sorgo   | 1,53                            | Aa | 1,33         | BCa | 1,43       | CDa | 3,59 <sup>ns</sup> |
| Crotalária  | 1,57                            | Aa | 1,67         | Aa  | 1,60       | BCa | 0,40 <sup>ns</sup> |
| Teste F   | 2,36 <sup>ns</sup>              |    | 5,93*        |     | 1,98*      |     |                    |

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ( $\alpha < 0,05$ ). Letras maiúscula mostram o efeito de culturas de inverno dentro de cada sequência de cultura de verão e letras minúsculas mostram o efeito das sequências de culturas de verão dentro de cada cultura de inverno. \* Significante a 5 % de probabilidade; <sup>ns</sup> não significante.



**Figura 1.** Distribuição de carbono (C) e nitrogênio (N), determinados nas frações carbono orgânico particulado médio (COP-M) com tamanho  $> 250 \mu\text{m}$ , carbono orgânico particulado fino (COP-F) com tamanho entre  $250 - 53 \mu\text{m}$ , e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) com tamanho  $< 53 \mu\text{m}$ . Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para os conteúdos de carbono e minúsculas para os conteúdos de nitrogênio, não diferem entre si ( $\alpha < 0,05$ ).

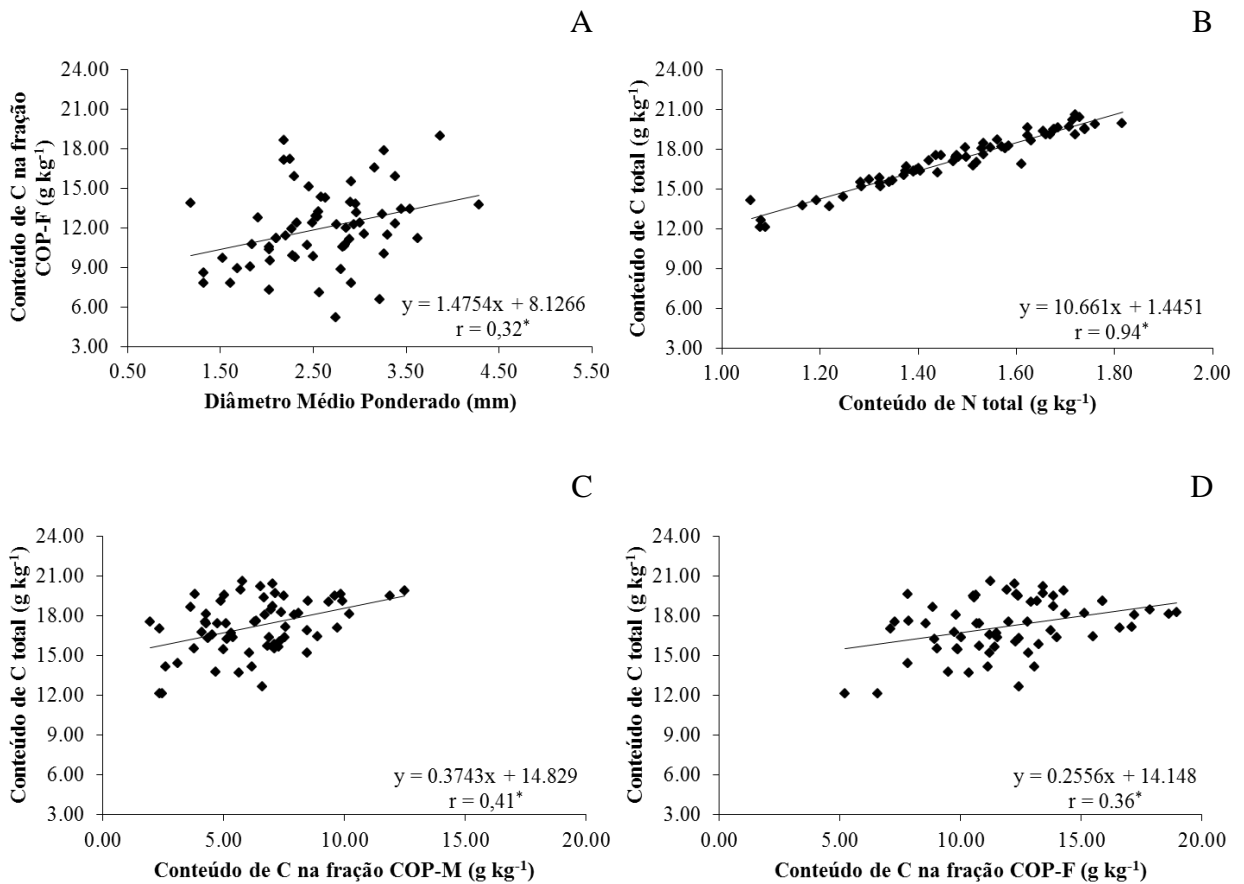


Figura 2. Correlação de Pearson ( $\alpha < 0,05$ ) entre o conteúdo de carbono determinado na fração C orgânico particulado fino (COP-F) com o diâmetro médio ponderado (A); entre o conteúdo total de carbono e nitrogênio (B); entre o conteúdo total de carbono com o C determinado na fração C orgânico particulado médio (COP-M) (C) e com o carbono determinado na fração C orgânico particulado fino (COP-F) (D).