

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

JEAN SÉRGIO ROSSET

**CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA, ATRIBUTOS QUÍMICOS E
FÍSICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO
OESTE DO PARANÁ**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2015

JEAN SÉRGIO ROSSET

**CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA, ATRIBUTOS QUÍMICOS E
FÍSICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO
OESTE DO PARANÁ**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

Orientadora: Dr^a. Maria do Carmo Lana

Coorientadores: Dr. Marcos Gervasio Pereira

Dr. Jolimar Antonio Schiavo

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2015

JEAN SÉRGIO ROSSET

CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA, ATRIBUTOS QUÍMICOS E
FÍSICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA
REGIÃO OESTE DO PARANÁ

Tese apresentada à Universidade
Estadual do Oeste do Paraná, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Agronomia, para
obtenção do título de *Doctor
Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2015



Marcos Gervasio Pereira
(Coorientador)
(UFRRJ)



Prof. Dr. Jolimar Antonio Schiavo
(Coorientador)
(UEMS)



Prof.ª Dr.ª Edleusa Pereira Seidel
(UNIOESTE)



Prof. Dr. Paulo Sérgio Rabello do Oliveira
(UNIOESTE)



Prof.ª Dr.ª Maria do Carmo Lana
(Orientadora)
(UNIOESTE)

Aos meus queridos pais Isac Sérgio Rosset e Hirma Grecco Rosset, pelas palavras de conforto e sabedoria que me sustentaram em meio às tempestades, pelo apoio, dedicação, compreensão e, por sempre acreditarem que eu pudesse chegar até aqui: realizar um sonho.

Ao meu grande e especial irmão Isac George Rosset, companheiro e fiel amigo, uma pessoa composta dos melhores e mais nobres elementos existentes.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos,

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que me destes nessa vida. Presente em todos os momentos, em todas as batalhas. Sempre lembrado. Tudo que conquistei devo a sua graça eterna.

Aos meus pais Isac Sérgio Rosset e Hirma Grecco Rosset, que nunca mediram esforços para continuar me incentivando a cada dia. Nos momentos difíceis, nos momentos de alegria, sempre estiveram comigo. Vocês não me deram tudo que queriam, mas me deram tudo o que tinham. Agradeço imensamente cada palavra de incentivo, cobrança e consolo durante todo esse período. Sou muito grato por ter vocês ao meu lado. A vocês devo a minha vida.

Ao meu admirável irmão Isac George Rosset, por todos os conselhos, broncas, cobranças, enfim, por tudo. Sempre me motivou e cobrou a continuar no caminho certo. Grande irmão. Irmão verdadeiro.

A professora, amiga e orientadora Maria do Carmo Lana, pela orientação, paciência, amizade, confiança e respeito. Obrigado por aceitar me orientar e, dessa forma, contribuir de forma imprescindível na minha vida profissional. Obrigado pelas cobranças e ensinamentos. Obrigado pela orientação e convívio durante esses três anos. Se não fosse pela senhora, talvez eu não chegasse ao final de mais essa etapa em minha vida.

Ao professor, amigo e coorientador Marcos Gervasio Pereira, pela imensurável ajuda durante todo o período do Doutorado. Obrigado pela orientação, paciência, cobrança, sinceridade, respeito e, principalmente a dedicação que o senhor teve por mim. Muito obrigado por me ajudar no planejamento deste trabalho. Obrigado por me receber em sua casa sempre que precisei, durante a fase de planejamento do trabalho e posteriormente na execução das análises no Rio de Janeiro. Obrigado por sempre estar disposto a me ajudar cientificamente com correções, sugestões e críticas. Tudo isso me fez evoluir muito profissionalmente nos últimos anos. Grande exemplo de dedicação, comprometimento e amor pelo que faz. Um grande exemplo pra mim, sempre.

Ao professor, amigo e coorientador Jolimar Antonio Schiavo, pela confiança, ensinamentos, orientação, cobranças e companheirismo. Ao final de mais essa etapa, somam-se dez anos de “orientação”. Muito obrigado por “abrir as portas” de seu

laboratório durante o período de análises em Mato Grosso do Sul. Obrigado por me atender sempre que precisei. Obrigado pelo ótimo convívio profissional e pessoal durante todo esse tempo.

Finalizando a parte de orientação... A vocês meus professores orientadores, Maria do Carmo Lana, Marcos Gervasio Pereira e Jolimar Antonio Schiavo, levarei sempre comigo o exemplo que vocês me passaram de otimismo, profissionalismo e amor pela profissão. Vocês sempre serão meus espelhos para com meus alunos. Sou eternamente grato a vocês. Espero que essa “parceria” dure muito tempo.

Aos proprietários das áreas cedidas para o estudo, Isac Sérgio Rosset, Maury Luiz Lovera, Airton Groff e Mauro Ito. Sem a colaboração de vocês este estudo não poderia ser realizado. Obrigado também pela disponibilização de todas as informações necessárias e apoio logístico nas coletas de solos.

Ao meu grande e fiel companheiro de coletas de solo, Isac Sérgio Rosset (meu Pai). Obrigado pela imensurável ajuda durante os 17 dias de coleta. Obrigado por todo o apoio motivacional, logístico, pós coleta e processamento das amostras. Espero chegar nessa fase da vida com tanta disposição assim.

Aos meus grandes amigos e companheiros de república durante esses três últimos anos, Martios Ecco, Paulo Ricardo Lima e Augustinho Borsoi. Longe de casa, foi com vocês que passei grandes momentos da minha vida. Obrigado por compartilharem momentos de estudos, conversas e descontração. Com vocês aprendi o verdadeiro sentido da amizade e do companheirismo. Sempre que precisei, estavam lá. Amizades que levarei por toda a vida.

Ao amigo Marcos Vinicius Mansano Sarto pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pelas correções, sugestões, críticas, ensinamentos e companheirismo. Um exemplo de dedicação.

Ao grande amigo e companheiro de laboratório Leandro Rampim. Muito obrigado pelo apoio, dedicação, companheirismo, respeito, incentivo e cobrança. Sempre que precisei, se colocou à disposição para me ajudar. Grande exemplo de dedicação e profissionalismo. Muito obrigado por me ajudar nos momentos de “turbulência” durante o curso, principalmente pelos conselhos profissionais e pessoais. Uma pessoa incrível, admirável, fantástica. Meu “quarto orientador”.

Aos amigos Paulo Vitor Dal Molin, Paulo Sérgio Diel, Alan Grigório Martins, Adriano Mitio Inagaki, Darlan Poli, Alexandre Müller, Jeferson Piano, Luiz Offemann e

Jonas Egewarth, pela amizade, ajuda na realização de coletas de solo, análises laboratoriais e participação nos momentos de descontração.

Aos amigos Ângela Laufer Rech, Agostinho Zanini e Tânia Vicentini Prestes, pela amizade, confiança e ensinamentos.

Aos amigos de turma, pelo companheirismo e trabalho em equipe no decorrer do curso: Martios Ecco, Augustinho Borsoi, Loreno Egídio Taffarel, Heloísa Ferro Mendonça, Deisnara Schulz, Sidiane Coltro, Fabiane Gusatto, Michelle Cristina Ajala, Cristina Schneider e Alice Jacobus de Moraes.

Ao Jucenei Fernando Frandoloso, pelas constantes ajudas e conselhos nos trabalhos no Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas. E também a equipe do professor Affonso Celso Gonçalves Junior, coordenador do Laboratório de Química Agrícola e Ambiental da UNIOESTE de Marechal Cândido Rondon, pelo apoio na realização de leituras das análises químicas.

Ao Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Agronomia (PPGA) da UNIOESTE de Marechal Cândido Rondon, pela oportunidade de realização deste curso. A todos os professores do PPGA pelos ensinamentos durante o transcorrer das disciplinas. Em especial a professora Edleusa Pereira Seidel, pela imensurável ajuda metodológica e técnica durante a coleta a campo e realização das análises físicas do solo em seu laboratório. Ao professor Paulo Sérgio Rabello de Oliveira, pelos ensinamentos e dicas para a realização deste trabalho. Ao professor Edmar Soares de Vasconcelos, pela ajuda na discussão estatística deste trabalho.

Ao professor Elói Panachuki, da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, campus de Aquidauana, no auxílio durante as análises físicas realizadas em seu laboratório. Grande amigo e parceiro profissional.

Ao professor e pesquisador da EMBRAPA-CPAO Júlio Cesar Salton. Em especial pela ajuda no planejamento desde o início deste trabalho e posteriores sugestões metodológicas e interpretativas. Ao professor e pesquisador também da EMBRAPA-CPAO Carlos Lázaro Pereira de Mello pelos auxílios nas decisões iniciais da parte estatística.

A toda a equipe de orientados do Laboratório de Gênese e Classificação de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), coordenado pelo professor Marcos Gervasio Pereira. Pela ajuda técnica, científica e metodológica durante o período de 60 dias de análises realizadas. Em especial ao Anderson Ribeiro Diniz, Cláudia Reis, Sidinei Julio Beutler, Roni Fernandes Guareschi, Gilsonley Lopes dos Santos, Deyvid

Carvalho, Elias Mendes, Jaqueline Jesus, Celeste Rossi, Sandra Lima, Leticia Pastore Mendonça, Victoria Monteiro, Wanderlei Bieluczyk, Eduardo Neto, Paula Fernanda, Vanessa Vital, Alexandre Nogueira, Alexandre Medeiros e Vanessa Fréo.

Aos amigos Anderson Ribeiro Diniz e Fabiano Prates, pelo apoio disponibilizando sua casa para minha estadia durante o período de análises no Rio de Janeiro. Agradecimento especial também as amigas Khadidja Dantas e Gabriela Cemirames pelo ótimo convívio entre vizinhos neste mesmo período.

Aos amigos Lenon Lovera, Kassyo Falcão, Brayan D'auria e Kaue Alcássio pela disponibilidade da república durante minha estadia nos três períodos de análises em Aquidauana. Obrigado pelo companheirismo de sempre. Grandes amigos.

As secretárias do PPGA da UNIOESTE, Leila Dirlene Allievi Werlang e Ana Paula Deves Rufino pelo comprometimento, atenção e auxílio.

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de auxílio ao estudo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro através da aprovação do Projeto Universal (Chamada - MCTI/CNPq N ° 14/2012). A Fundação AGRISUS – Agricultura Sustentável (Projeto 1210/13), pela disponibilidade de bolsa de Iniciação Científica aos alunos de graduação da UFRRJ que ajudaram na realização deste trabalho.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”

(Charles Chaplin)

BIOGRAFIA

Jean Sérgio Rosset, nascido em 12 de dezembro de 1987, em Guaíra, estado do Paraná, filho de Isac Sérgio Rosset e Hirma Grecco Rosset. Ingressou no curso de Agronomia da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), campus de Aquidauana, no primeiro semestre do ano de 2005, onde graduou-se em dezembro de 2009. Nesta mesma instituição, foi bolsista de monitoria entre os anos de 2006 a 2008 e bolsista de iniciação científica no período de agosto de 2008 a julho de 2009 no Laboratório de Matéria Orgânica e Microbiologia do Solo. Ainda pela UEMS, em fevereiro de 2010, ingressou no Mestrado no Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Agronomia, concluindo o Mestrado em janeiro de 2012. Em março de 2012 ingressou no Doutorado no Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Agronomia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Marechal Cândido Rondon.

RESUMO

ROSSET, Jean, S. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2015. **Caracterização da matéria orgânica, atributos químicos e físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná.** Orientadora: Maria do Carmo Lana. Coorientadores: Marcos Gervasio Pereira e Jolimar Antonio Schiavo.

A avaliação da qualidade dos sistemas agrícolas tem grande importância na manutenção e aumento da capacidade de suporte das áreas produtivas. A matéria orgânica do solo (MOS) e suas respectivas frações, associadas a outros indicadores, trazem resultados satisfatórios para a avaliação dos atributos edáficos. O presente trabalho teve como objetivos: avaliar os atributos químicos e físicos do solo, os teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e seus indicadores, avaliar as frações químicas, físicas e oxidáveis da MOS, suas distribuições, relações e estoques, avaliar os índices de manejo de carbono (IMC), os parâmetros estruturais do solo via indicadores de tamanho e estabilidade de agregados e evolução de carbono (C) na forma de dióxido de C (CO_2) em agregados incubados em laboratório, em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação. As coletas de solo foram realizadas em sistemas agrícolas localizados no município de Guaíra, PR. Foram avaliadas seis áreas em delineamento inteiramente casualizado com histórico de manejo diferenciado, sendo elas: áreas com diferentes tempos de adoção do sistema plantio direto (SPD) por 6, 14 e 22 anos sob sucessão de culturas soja (verão) e milho/trigo (inverno) (SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente); 12 anos de SPD no mesmo sistema de sucessão e mais 4 anos com introdução de braquiária em consórcio com o milho nos cultivos de inverno (M+B); pastagem permanente e mata nativa. Para análises dos atributos químicos, físicos, teores de COT, e frações da MOS, com seus respectivos cálculos de estoques, índices e relações, as amostras foram coletadas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, em cinco amostras compostas para cada área e camada. Para as análises do estado de agregação do solo, as amostras foram coletadas em cinco repetições, nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m. As áreas manejadas apresentaram menores valores para porosidade, e maiores valores para densidade e resistência a penetração em relação a área sob mata. Houve tendência de aumento lento e gradual nos teores e estoques de COT em função do tempo de adoção do SPD, com diferenças significativas após 22 anos de condução em relação as demais. Verificou-se contribuição em aumento de C de camadas mais profundas pela ação do sistema radicular das gramíneas. Houve predomínio da fração humina (HUM) em relação as frações do extrato alcalino (EA) (ácido húmico (AH) e ácido fúlvico (AF)), com movimentação das frações do EA em profundidade. As frações oxidáveis da MOS apresentaram equilíbrio em sua distribuição relativa, sendo que a sucessão de culturas contribui para aumento das frações lábeis do C, especialmente F1. A área de SPD₂₂ apresentou os melhores indicadores de IMC em relação a demais áreas manejadas. O tempo de adoção do SPD beneficiou a evolução dos parâmetros estruturais de agregação do solo e maior atividade biológica via evolução de C- CO_2 . O consórcio M+B promoveu melhorias na qualidade estrutural dos agregados do solo. Os melhores parâmetros dentre as áreas manejadas foram obtidos após 22 anos de condução em SPD, evidenciando a melhoria na qualidade do solo com o passar dos anos de adoção deste sistema conservacionista de manejo.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Carbono. Qualidade do solo.

ABSTRACT

ROSSET, Jean, S. State University of Western Paraná, in February 2015. **Characterization of organic matter, chemical and physical properties of the soil under different management systems in the western region of Paraná.** Advisor: Maria do Carmo Lana. Co-Advisors: Marcos Gervasio Pereira e Jolimar Antonio Schiavo.

The evaluation of the quality of agricultural production systems is of great importance for the maintenance and increase of production capacity of agricultural areas. Soil organic matter (SOM) and their fractions, associated with other indicators, provides satisfactory results for the assessment of soil properties. The aims of this study were to determine the effects of management systems with different deployment times on soil chemical and physical properties, total soil organic carbon (TOC) stock and its indicators; to assess the distribution and stock of soil organic matter fractions; and to assess the carbon management index (CMI), soil structural quality indicators based on particle size and aggregate stability and evolution of carbon in the form of carbon dioxide (CO₂) into aggregates incubated in the laboratory. Soil samples were collected in agricultural systems located in Guaíra, Paraná State, Brazil. Five managed areas and a reference area (native forest) without anthropic action were analyzed in a completely randomized design with five replications. Management systems include three areas with different time of first adoption of the no-till: 6 (NT₆), 14 (NT₁₄) and 22 years (NT₂₂) under continuous soybean–maize or wheat cropping system; 12 years of no-till under soybean–maize or wheat cropping systems, and in the last four years with integration of maize and ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*) – (NT+B) and an area of permanent and continuous extensive cattle pasture of coast-cross (*Cynodon dactylon*). Soil physical and chemical properties, TOC stock and distribution and stock of soil organic matter fractions were evaluated at depths from 0-0.05; 0.05-0.1; 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m. Soil aggregate stability was evaluated at depths from 0-0.05 and 0.05-0.1 m. The managed areas showed the lowest values for total soil porosity, and higher values for soil bulk density and soil penetration resistance for area compared to the native forest area. There was slow and gradual increase in the TOC stocks due to the time of adoption of the no-till practices, with significant differences in the area with 22 years of no-tillage compared with other areas. There was increase of carbon in the deep layers of soil by the action of the root system of grasses. There was predominance of humin fraction (H) in relation fractions of the alkaline extract (AE), humic acid (HA) and fulvic acid (FA), with percolation of AE fractions in depth. The oxidizable fractions of soil organic matter showed a balance in their relative distribution, and continuous soybean, maize/wheat cropping system contributed to the increase of labile carbon fraction, especially F1. The NT₂₂ area showed the best CMI indicators compared to other managed areas. The time of adoption of the NT improved the structural parameters of soil aggregation and biological activity through the evolution of CO₂. The M+B consortium promoted improvements in the structural quality of soil aggregates. The best soil quality indicators among the managed areas were obtained after 22 years of no-till adoption, indicating the improvement of soil quality with the time of adoption of this conservation management system.

Key words: No-till. Carbon. Soil quality.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS.....	9
3 CAPÍTULO 1: ESTOQUE DE CARBONO, ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO COM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ, BRASIL	17
3.1 RESUMO	17
3.2 ABSTRACT	18
3.3 INTRODUÇÃO.....	18
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo.....	20
3.4.2 Sistemas Avaliados e Histórico de Uso.....	21
3.4.3 Coleta de Amostras de Terra	23
3.4.4 Análises Realizadas.....	23
3.4.5 Análises Estatísticas	25
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.5.1 Atributos Físicos	25
3.5.2 Atributos Químicos	29
3.5.3 Teores e Estoque de Carbono Orgânico Total.....	31
3.6 CONCLUSÕES.....	38
3.7 REFERÊNCIAS	38
4 CAPÍTULO 2: FRAÇÕES QUÍMICAS E OXIDÁVEIS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ.....	44
4.1 RESUMO.....	44
4.2 ABSTRACT.....	45
4.3 INTRODUÇÃO.....	46
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	47
4.4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo.....	47
4.4.2 Sistemas Avaliados e Histórico de Uso.....	48
4.4.3 Coleta de Amostras de Terra	48
4.4.4 Análises Realizadas.....	48
4.4.5 Análises Estatísticas	50
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.5.1 Carbono Orgânico Total e Carbono e Estoque das Frações Húmicas da Matéria Orgânica do Solo	50

4.5.2 Frações Oxidáveis da Matéria Orgânica do Solo.....	58
4.6 CONCLUSÕES.....	63
4.7 REFERÊNCIAS.....	63
5 CAPÍTULO 3: FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA E AGREGAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO COM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO.....	68
5.1 RESUMO.....	68
5.2 ABSTRACT.....	69
5.3 INTRODUÇÃO.....	69
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	71
5.4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo.....	71
5.4.2 Sistemas Avaliados e Histórico de Uso.....	71
5.4.3 Coleta das Amostras de Terra.....	71
5.4.4 Análises Realizadas.....	72
5.4.5 Análises Estatísticas.....	76
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
5.5.1 Carbono Orgânico Total, Frações Físicas da Matéria Orgânica e Índice de Manejo de Carbono.....	76
5.5.2 Estabilidade de Agregados e Carbono Mineralizável.....	83
5.6 CONCLUSÕES.....	89
5.7 REFERÊNCIAS.....	89
6 CONCLUSÕES GERAIS.....	95
7 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	96
APÊNDICE.....	98

1 INTRODUÇÃO GERAL

A região Oeste do estado do Paraná caracteriza-se pela utilização de agricultura de forma intensiva, devido principalmente as características de solo, clima e topografia existentes. Deste modo, o cultivo em sucessão de culturas soja (verão) e milho/trigo (inverno) em sistema plantio direto (SPD) abrange grande parte das áreas agrícolas da região. Historicamente, após o desmatamento das áreas, realizado no início da década de 1970, com a retirada da vegetação nativa, as áreas foram convertidas para sistemas de cultivo com intenso revolvimento do solo (sistema de plantio convencional – SPC) somado a queima da palhada para facilitar a semeadura e manejo, especialmente pela característica dos maquinários e tecnologias de cultivo da época. Na década de 1990, as primeiras áreas de SPC foram convertidas em SPD, com esse sistema se consolidando na região no início da década de 2000.

A utilização de sistemas conservacionistas de manejo como o SPD, visa aumentar a sustentabilidade da agricultura nos aspectos econômicos e ambientais. Este sistema preconiza a eliminação/redução das operações de preparo do solo, uso de herbicidas para o controle de plantas daninhas, formação de cobertura morta sobre a superfície do solo, rotação de culturas e utilização de maquinário específico (CRUZ et al., 2001). Quando adotado de acordo com seus princípios básicos, proporciona inúmeros benefícios, como a racionalização do uso de insumos e máquinas, conservação/melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, além de menor perda de solo, água e nutrientes (CASSOL; DENARDIN; KOCHMANN, 2007).

Com o passar dos anos, alternativas de sistemas conservacionistas foram surgindo, sendo também adotados na região, como o consórcio entre culturas agrícolas com ou sem a introdução de animais, especialmente o sistema de consórcio milho e braquiária. Esse sistema surgiu com o intuito de aumentar a produção de palha nos cultivos de inverno para a semeadura da soja nos cultivos subsequentes de verão (CRUSCIOL et al., 2013). Vários trabalhos na literatura sob condições específicas, relatam a melhoria dos atributos químicos (FOLONI et al., 2008), físicos (SALTON et al., 2008) e biológicos (BELL; MOORE, 2012), além da maximização do uso da terra (LANDERS, 2007) e melhoria da qualidade do solo através da adoção deste sistema conservacionista de manejo (CHILDEROLI, 2010).

Essa substituição de sistemas de manejo com intenso revolvimento do solo por sistemas conservacionistas, geram modificações nos atributos edáficos, que podem ser avaliadas através de indicadores de qualidade ao longo do tempo (ARAÚJO et al., 2012). A avaliação da qualidade do solo é feita por um conjunto de indicadores químicos, físicos e biológicos (QI et al., 2009). Diversas práticas de manejo do solo são consideradas necessárias

para sustentar o rendimento das culturas (AZIZ; MAHMOOD; ISLAM, 2013) e conservar ou melhorar a qualidade do solo (ÁLVARO-FUENTES; EASTER; PAUSTIAN, 2012), resultando em mudanças na qualidade funcional do sistema agrícola (AZIZ; MAHMOOD; ISLAM, 2013). Desta forma, a avaliação destas modificações em conjunto são reconhecidas como necessárias (PARKIN; DORAN; FRANCO-VIZCAINO, 1996). Dentre os indicadores existentes, a matéria orgânica do solo (MOS) é considerada um dos melhores indicadores, devido à sua influência direta nos atributos físicos, químicos e biológicos do sistema solo (BAYER et al., 2004).

Sistemas de cultivo agrícola quando manejados de forma incorreta, especialmente com intenso revolvimento, tem sido observada redução da qualidade do solo (BAYER et al., 2004), causando degradação e perdas de produtividade (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2013). Por outro lado, ao serem manejados corretamente, com a introdução de sistemas conservacionistas, como o SPD (BODDEY et al., 2010; CARVALHO et al., 2010) e consórcio entre culturas e pastagens (ACHARYA; RASMUSSEN; ERIKSEN, 2012; BELL; MOORE, 2012), pode ocorrer melhoria nos atributos do solo, como aumento nos teores de carbono orgânico total (COT) (WEST; POST, 2002), diversidade de macrofauna (BARTZ et al., 2014) e microfauna (BABUJIA et al., 2014), maior estabilidade estrutural e tamanho de agregados (FOLEY et al., 2005), incremento nos teores das bases trocáveis e fósforo, especialmente em camadas superficiais do solo (DALCHIAVON et al., 2012), além de reduzir a erosão hídrica (MELLO et al., 2006). A melhoria na qualidade do solo aliado a diminuição dos custos, características estas que são atreladas aos sistemas conservacionistas, proporcionam, em vista dos seus benefícios, aumento da área cultivada em todo o mundo (DIMASSI et al., 2014).

Uma característica importante para analisar no SPD é avaliar o padrão com o tempo de adoção do sistema. É interessante destacar a importância do tempo de implantação do SPD para que se processem alterações tais como acúmulo de MOS, melhoria dos atributos físicos, ciclagem de nutrientes e aumento da atividade biológica (SÁ et al., 2004). O SPD nos primeiros 5 anos de implantação, está na fase inicial de adoção do sistema, onde se tem baixos teores de MOS, menor acúmulo de palhada, início do processo de agregação e restabelecimento da atividade microbiana. A medida que aumenta o tempo de implantação (5-10 anos, fase de transição; 10-20 anos, fase de consolidação e mais de 20 anos, fase de manutenção), têm-se melhoria dos atributos edáficos ao serem manejados corretamente (ANGHINONI, 2007).

Os solos tropicais têm a MOS como um dos principais componentes responsáveis pela manutenção da sua qualidade (CARTER, 2002). O impacto dos sistemas de manejo sobre a MOS, ou em outras palavras, sobre o ciclo do carbono (C) do solo merece especial atenção (ZOTARELLI, 2005). Com a remoção da vegetação nativa para a implantação de

agroecossistemas, tem sido observada redução na quantidade (MARTINS; CORINGA; WEBER, 2009) e qualidade da MOS (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003; LOSS et al., 2014a;), principalmente em sistemas de cultivo com intenso revolvimento do solo (PLAZA-BONILLA; CANTERO-MARTÍNEZ; ÁLVARO-FUENTES, 2010). Os efeitos dessa perturbação são geralmente negativos para as propriedades edáficas (COLEMAN; OADES; UEHARA, 1989), pois, quando manejada, a fração orgânica não apresenta a mesma estabilidade das frações minerais (CUNHA et al., 2001). Em solos com cobertura vegetal natural, o COT encontra-se em equilíbrio dinâmico, com teores praticamente constantes com o tempo (D'ANDRÉA et al., 2004). O decréscimo no conteúdo de MOS com o tempo de conversão floresta-agricultura, se deve a rápida mineralização do C proveniente da floresta, e de fatores que influenciam a taxa de mineralização deste C (BERNOUX et al., 1999).

Os diferentes tipos de solos agem de forma diferenciada na dinâmica da MOS, pois o conteúdo e tipos de argila influenciam na preservação do COT, especialmente nos processos de proteção do C no solo, como a formação de compostos recalcitrantes, proteção no interior dos agregados (proteção física) e proteção coloidal (bioquímica) (SIX et al., 2002a), como acontece nos Latossolos encontrados em grande parte das áreas agrícolas brasileiras (BODDEY et al., 2010). Essa preservação do C no solo influencia seu estoque pelas taxas de adição e perda relatadas no modelo unicompartimental de acúmulo de C (HENIN; DUPUIS, 1945).

O acúmulo de C anual pode apresentar grande variabilidade entre regiões (DIMASSI et al., 2014; WEST; POST, 2002), principalmente pela diversidade de clima (ÁLVARO-FUENTES; EASTER; ERIKSEN, 2012; BLAIR, 2000), solos (JOHNSTON; POULTON; COLEMAN, 2009), sistemas de manejo do solo (BENBI et al., 2015; MARRIOTT; WANDER, 2006), rotações de culturas adotadas (BODDEY et al., 2010; SISTI et al., 2004) e profundidade amostrada (BAKER et al., 2007), tendo sempre como base a comparação de sistemas de manejo em relação a áreas sob vegetação natural (CORAZZA et al., 1999).

Essas variações nos teores de COT são relatadas em vários experimentos sob SPD de longa duração nas regiões Sul (BODDEY et al., 2010; DIEKOW et al., 2005; SISTI et al., 2004) e Centro-Oeste do Brasil (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2012; SIQUEIRA NETO et al., 2010). Porém, de acordo com a forma de manejo e clima, esse acúmulo de C acontece de forma lenta (CARVALHO et al., 2010). Após a conversão do SPC para o SPD, West e Post (2002) relataram, sob várias condições climáticas a nível mundial que, a máxima taxa de acúmulo de C acontece entre 5-10 anos de conversão do sistema. Em regiões tropicais, de clima quente e úmido, existe dificuldade em aumentar os teores e estoques de C do solo (FRAZÃO et al., 2010), ou seja, equiparar aos níveis das áreas sob vegetação natural (BLAIR, 2000).

Nos últimos anos, em razão do efeito estufa, existe interesse cada vez maior na identificação de sistemas de manejo que favoreçam o acúmulo de C (KAISER; GUGGENBERGER, 2003). Práticas de manejo, que visam minimizar a perturbação e maximizar as entradas de C no solo, aumentam os estoques de C (BENBI et al., 2015), e influenciam, desta forma, as propriedades do solo, conseqüentemente, a produtividade das culturas (BRONICK; LAL, 2005), sendo que, o SPD quando manejado segundo seus princípios básicos, pode contribuir para a manutenção da capacidade produtiva das áreas agrícolas (ZOTARELLI, 2005).

Níveis adequados de MOS aportados pelos sistemas conservacionistas auxiliam na manutenção da fertilidade e, minimizam os impactos agrícolas sobre o meio ambiente pelo sequestro de C (BERNOUX et al., 1999), reduzindo ainda as taxas de decomposição e as emissões de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera (ÁLVARO-FUENTES; EASTER; PAUSTIAN, 2012). Desta forma, estudos visando a avaliação da magnitude destes mecanismos (PINHEIRO et al., 2004) são fundamentais para o entendimento da dinâmica da MOS (BERNOUX et al., 1999). Diante disso, fica evidente a importância e a necessidade de estudos a respeito do fracionamento do carbono nos solos para fornecer subsídios para o melhor manejo agrícola com sustentabilidade (SOUZA et al., 2006).

Existem várias formas de se estudar a dinâmica da MOS, dentre elas, se destacam o fracionamento químico (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003; SWIFT, 1996), o fracionamento físico (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; CONCEIÇÃO et al., 2005) e o fracionamento oxidável (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001).

A MOS pode ser dividida em dois grandes compartimentos. Um composto pela fração não humificada, ou seja, pouco decomposta, e outro pela fração humificada. A matéria orgânica humificada do solo (substâncias húmicas - SH), é composta por diferentes frações de acordo com sua solubilidade (CANELLAS et al., 2001). Essas SH se dividem em humina (HUM), ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF). A fração HUM, apesar de apresentar baixa reatividade, é responsável pela agregação das partículas minerais e, na maioria dos solos tropicais, representa boa parte do C humificado (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003), com elevado tempo de permanência no solo (STEVENSON, 1994). Os AH representam a fração intermediária, entre os compostos orgânicos de maior estabilidade química (HUM), e a ocorrência de ácidos orgânicos oxidados livres na solução do solo (AF) (CANELLAS et al., 2003). Os AF são compostos de maior solubilidade, sendo os principais responsáveis por mecanismos de transporte de cátions no solo, sendo a fração mais instável do processo de

humificação dos resíduos orgânicos componentes da MOS (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003).

Em solos não manejados como solos sob vegetação de mata nativa, as etapas do processo de humificação realizam-se plenamente (ARAÚJO et al, 2011), o que resulta na maior proporção de frações de maior estabilidade estrutural como a fração HUM (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003). Os processos de humificação e, conseqüente benefício a estabilização química da MOS, também são relatados em diversos trabalhos sob sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o SPD e consórcio entre culturas (ASSIS et al., 2006; BEZERRA et al., 2013; CAMPOS et al., 2013; GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2013; LOSS et al., 2014b; SOUZA; MELO, 2003).

O fracionamento físico da MOS é outra técnica utilizada para identificação da dinâmica da MOS em relação aos diferentes sistemas de manejo utilizados. O fracionamento granulométrico (peneiramento) consiste na separação de duas frações orgânicas: o carbono da matéria orgânica particulada (C-MOP), e o carbono da matéria orgânica associada aos minerais (C-MOM) (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). A utilização de sistemas de manejo que promovam diferentes aportes de biomassa vegetal pode ser identificada principalmente por meio da fração particulada da MOS (BENBI et al., 2015; CARTER, 2002), considerada mais sensível as alterações no solo (CONCEIÇÃO et al., 2005; MARRIOTT; WANDER, 2006), podendo ser utilizada como ferramenta para avaliar a qualidade do sistema principalmente em curto período de tempo (GREGORICH et al., 2006), quando as alterações no COT do solo ainda não tenham sido de grande magnitude (CONCEIÇÃO et al., 2005).

O C-MOM é normalmente, menos modificado pelas diferentes formas de manejo adotadas, principalmente em curto prazo, pois apresenta ciclagem mais lenta (BAYER et al., 2004), sendo uma fração composta por substâncias húmicas, com forte interação com as frações silte e argila, exercendo papel significativo na estabilização dos microagregados (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Mediante avaliações dos compartimentos granulométricos da MOS, é possível estimar índices de manejo de C (IMC) entre as áreas cultivadas e aquelas em equilíbrio (vegetação nativa), ampliando o número de indicadores de avaliação da qualidade do compartimento orgânico do solo (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995).

A partir da modificação do método clássico de determinação de COT (WALKEY; BLACK, 1934); Chan, Bowman e Oates (2001) adaptaram a metodologia para determinar frações do C mediante seu grau de oxidação. Desta forma, é possível realizar avaliação de compartimentos de C desde os mais lábeis até os mais recalcitrantes, sendo divididas em quatro frações (F1, F2, F3 e F4) com graus decrescentes de oxidação. As frações F1 e F2 estão

associadas com a disponibilidade de nutrientes e formação de macroagregados (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995; CHAN; BOWMAN; OATES, 2001), sendo a fração F1 a de maior labilidade no solo (BARRETO et al., 2011). Já as frações F3 e F4 estão relacionadas aos compostos de maior estabilidade química e massa molar, oriundos da decomposição e humificação da MOS (STEVENSON, 1994). A fração F4 é a mais resistente no solo, sendo denominada de “compartimento passivo” nos modelos de simulação da MOS, com tempo de reciclagem de até 2.000 anos (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001). A proporção de distribuição destas frações no solo também se configura como indicadores de qualidade, visto que o equilíbrio entre essas frações é necessário para a manutenção/melhoria da qualidade dos sistemas produtivos (ZHONGKUI; WANG; SUN, 2010).

As técnicas de fracionamento da MOS, sejam elas químicas, físicas ou oxidáveis, trazem resultados detalhados e conclusivos sobre a dinâmica da MOS ao longo do tempo sob diversos sistemas de manejo. Portanto, a avaliação precisa das frações de C do solo se torna muito importante (KNOX et al., 2015).

Aliada as técnicas de fracionamento do C, o estudo dos agregados do solo tem contribuído para o melhor entendimento dos processos de estruturação e melhoria dos atributos edáficos (COSTA et al., 2004). Agregados do solo são os aglomerados de partículas, desde o tamanho da argila (iguais a ou menores que 2 μm) até maiores que areia (> 2000 μm). São divididos em macroagregados, maiores que 250 μm , e microagregados os menores que este limite (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004), sendo estes últimos, mais resistentes à desestruturação em relação aos macroagregados (SIX et al., 2002b). A agregação do solo também representa um bom indicador de qualidade dos sistemas agrícolas, através de seus vários indicadores como o diâmetro médio ponderado (KIEHL, 1979), diâmetro médio geométrico (KEMPER; ROSENAU, 1986), porcentagem de agregados maiores que 2,00 mm (LE BISSONNAIS et al., 2007), índice de sensibilidade (BOLINDER et al., 1999) e carbono mineralizável em agregados incubados em laboratório (LIM et al., 2012).

A MOS é um dos principais agentes agregantes (CHENU; BISSONNAIS; ARROUAYS, 2000) e, a diminuição do seu conteúdo pelo cultivo contínuo, é uma das maiores causas da degradação da estrutura do solo (WENDLING et al., 2005). A utilização de sistemas de cultivo que promovam incrementos de MOS, como o SPD, pode contribuir para o aumento da estabilidade de agregados e melhoria da qualidade física do solo (BHATTACHARYYA et al., 2009). Além disso, o processo de agregação também é responsável pelo sequestro do C e aumentos nos teores de MOS, em função da formação de complexos organo-minerais estáveis (LAWAL; OGUNWOLE; UYOVBISERE, 2009), reduzindo as emissões de CO_2 para a

atmosfera (BRONICK; LAL, 2005), proporcionando maior sustentabilidade aos sistemas agrícolas. Six et al. (2004) enfatizam a importância da pesquisa sobre o processo de formação de agregados em relação a MOS. O entendimento das relações entre os atributos químicos, físicos e biológicos e a dinâmica da MOS é importante, pois ajuda a prever possíveis mudanças no sistema solo, com reflexos na qualidade dos sistemas produtivos.

Pela importância agrícola da região Oeste do Paraná, e suas características de cultivo com sistema de sucessão de culturas de soja (verão) e milho/trigo (inverno) em SPD, e mais recentemente com a utilização de consórcios entre culturas anuais e pastagens nos cultivos de inverno, somado as características de solo e clima, o estudo da matéria orgânica em seus diversos compartimentos, suas relações com os atributos químicos e físicos, aliados ao fracionamento dos agregados do solo, bem como suas relações com sistemas de manejo de longa duração, visa identificar, desenvolver e recomendar estratégias para utilização sustentável dos solos, com vistas na melhoria da qualidade produtiva e redução do impacto das atividades agrícolas sobre o ambiente.

A partir do exposto, este projeto desenvolvido entre a Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), em parceria com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Chamada Universal MCTI/CNPq Nº 14/2012) e a Fundação AGRISUS (Projeto 1210/13), teve como hipótese que sistemas de manejo de longa duração, a exemplo do SPD no sistema de sucessão de culturas soja (verão) e milho/trigo (inverno) e consórcio entre milho e braquiária, promovem modificações nos atributos químicos e físicos do solo, nos teores de carbono e formas da MOS, desta forma, trazendo melhorias aos atributos edáficos. Para avaliar essa hipótese, esta tese foi dividida em 3 capítulos com diferentes objetivos:

O capítulo I intitulado “Estoque de carbono, atributos químicos e físicos do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação na região Oeste do Paraná, Brasil”, teve como objetivos: avaliar os atributos químicos e físicos do solo, os teores e estoques de carbono orgânico total (COT), a variação nos estoques de COT das áreas manejadas e o índice de estratificação de carbono.

O capítulo II intitulado “Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná”, teve como objetivos: avaliar a qualidade do solo mediante o fracionamento químico e oxidável da MOS quantificando a distribuição, estoques e equilíbrio destas frações.

O capítulo III intitulado “Frações físicas da matéria orgânica e agregação do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação”, teve como objetivos: avaliar as frações físicas da MOS, os estoques de carbono particulado e carbono mineral, os índices de manejo de carbono (IMC) e os parâmetros estruturais do solo via indicadores de tamanho e estabilidade de agregados e evolução de carbono em agregados incubados.

2 REFERÊNCIAS

ACHARYA, B. S.; RASMUSSEN, J.; ERIKSEN, J. Grassland carbon sequestration and emissions following cultivation in a mixed crop rotation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 153, n. 15, p. 33-39, 2012.

ÁLVARO-FUENTES, J.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K. Climate change effects on organic carbon storage in agricultural soils of northeastern Spain. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam v. 155, n. 15, p. 87-94, 2012.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 6, p. 873-928.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 41, n. 1, p. 103-114, 2011.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.

ASSIS, C. P.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1541-1550, 2006.

AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 609-617, 2004.

AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 131, n. 7, p. 28-35, 2013.

BABUJIA, L. C.; SILVA, A. P.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial diversity in an Oxisol under no-tillage and conventional tillage in southern Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 863-870, 2014.

BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 118, n. 1-4, p. 1-5, 2007.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; FONTES, A. G.; POLIDORO, J. C.; MOCO, M. K. S.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 81, n. 3, p. 213-220, 2011.

BARTZ, M. L. C.; BROWN, G. G.; ORSO, R.; MAFRA, Á. L.; BARETTA, D. The influence of land use systems on soil and surface litter fauna in the western region of Santa Catarina. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 880-887, 2014.

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, p. 677-683, 2004.

BELL, L. W.; MOORE, A. D. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 111, n. 7, p. 1-12, 2012.

BENBI, D. K.; BRAR, K.; TOOR, A. S.; SINGH, P. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in northern India. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237-238, n. 1, p. 149-158, 2015.

BENITES, V. M.; MÁDARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado e de baixo custo**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2003. 7p. (Comunicado Técnico, 16).

BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; GERALDES, A. P. A.; FERNANDES, S. A. P. Carbono e nitrogênio em solo de uma cronossequência de floresta tropical - pastagem de Paragominas. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1-11, 1999.

BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Formas de carbono em latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado, Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2637-2654, 2013.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; SRIVASTVA, A. K.; GUPTA, H. S. Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas under different tillage and crop regimes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 132, n. 1-2, p. 126-134, 2009.

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

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 183-191, 2000.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; 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**, Illinois, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 37-45, 1999.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; BRASIL, E. L.; IWATA, B. F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 304-312, 2013.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. Distribuição da matéria orgânica e características de ácidos húmicos em solos com adição de resíduos de origem urbana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1529-1538, 2001.
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; RESENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.
- CARTER, M. R. Soil Quality for Sustainable Land Management: Organic Matter and Aggregation Interactions that Maintain Soil Functions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 38-47, 2002.
- CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 277-289, 2010.
- CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema plantio direto: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. SBCS, v.5, p.333-370, 2007.
- CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, Philadelphia, v. 166, n. 1, p. 61-67, 2001.
- CHENU, C.; BISSONNAIS, Y. L.; ARROUAYS, D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 4, p. 1479-1486, 2000.
- CHIODEROLI, C.A. **Consortiação de braquiárias com milho outonal em sistema plantio direto como cultura antecessora da soja de verão na integração agricultura-pecuária**. 2010. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2010.
- COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: NIFTAL Project, 1989. 200p.
- CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com iodeto e politungstato de sódio em estudos de proteção física da matéria orgânica do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife. SBCS, 2005, 1 CD-ROM.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; BORGHI, E.; LELES, E. P.; SANTOS, N. C. B. Effect of intercropping on yields of corn with different relative maturities and palisadegrass. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 3, p. 599-606, 2013.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; SANTANA, D. P. Plantio direto e sustentabilidade do sistema agrícola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 13-24, 2001.

CUNHA, T. J. F.; MACEDO, J. R.; RIBEIRO, L. P.; PALMIERI, F.; FREITAS, P. L.; AGUIAR, A. C. Impacto do manejo convencional sobre propriedades físicas e substâncias húmicas de solos sob Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 27-36, 2001.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.

DIMASSI, B.; MARYA, B.; WYLLEMANC, R.; LABREUCHE, J.; COUTURE, D.; PIRAUX, F.; COHAN, J. P. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 188, n. 4, p. 134-146, 2014.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, Nova York, v. 309, n. 5734, p.570-574, 2005.

FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S.; CALONEGO, J. C.; ALVES JUNIOR, J. Aplicação de fosfato natural e reciclagem de fósforo por milheto, braquiária, milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p.1147-1155, 2008.

FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 10, p. 1198-1204, 2010.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; MCKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 975-985, 2006.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 909-920, 2012.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2615-2628, 2013.

HENIN, C.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 15, n. 1, p. 17-29, 1945.

JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; COLEMAN, K. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 101, n. 1, p.1-57, 2009.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Mineral surfaces and soil organic matter. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, n. 2, p. 219-236, 2003.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods**. Madison, American Society of Agronomy, 1986. cap. 17, p. 425-443.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres. 1979. 263 p.

KNOX, N. M.; GRUNWALD, S.; MCDOWELL, M. L.; BRULAND, G. L.; MYERS, D. B.; HARRIS, W. G. Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 239-240, n. 2, p. 229-239, 2015.

LANDERS, J. N. **Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture. The Brazilian experience**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007. 92p.

LAWAL, H. M.; OGUNWOLE, J. O.; UYOVBISERE, E. O. Changes in soil aggregate stability and carbon sequestration mediated by land use practices in a degraded dry savanna alfisol. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, Yucatán, v. 10, n. 3, p. 423-429, 2009.

LE BISSONNAIS, Y.; BLAVET, D.; DE NONI, G.; LAURENT, J. Y.; ASSELINE, J.; CHENU, C. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, n. 1, p. 188-195, 2007.

LIM, S. S.; LEE, K. S.; LEE, S. I.; LEE, D. S.; KWAK, J. H.; HAO, X.; RO, H. M.; CHOI, W. J. Carbon mineralization and retention of livestock manure composts with different substrate qualities in three soils. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 12, n. 3, p. 312-322, 2012.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 30, n. 1, p. 43-54, 2014a.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Research**, Victoria, v. 52, n. 7, p. 685-697, 2014b.

MARRIOTT, E. E.; WANDER, M. M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 950-959, 2006.

MARTINS, E. L.; CORINGA, J. E. S.; WEBER, O. L. S. Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico-LVAd sob diferentes agrossistemas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 2, p. 655-660, 2009.

MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Potential of soil carbon sequestration for the brazilian atlantic region. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C.E.P. (eds). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Haworth, 2006. cap. 15B, p. 349-368.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, n. 3, p. 85-91, 2013.

PARKIN, T. B.; DORAN, J. W.; FRANCO-VIZCAINO, E. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds.), **Methods for Assessing Soil Quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. cap. 14, p. 231-246.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 731-737, 2004.

PLAZA-BONILLA, D.; CANTERO-MARTÍNEZ, C.; ÁLVARO-FUENTES, J. Tillage effects on soil aggregation and soil organic carbon profile distribution under Mediterranean semi-arid conditions. **Soil Use Management**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 465-474, 2010.

QI, Y.; DARILEK, J. L.; HUANG, B.; ZHAO, Y.; SUN, W.; GU, Z. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, n. 3-4, p. 325-334, 2009.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E.; BUCKNER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M. F. M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S. P.; PAULLETI, V.;

SIQUEIRA NETO, M. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 84, n. 1, p.45-61, 2004.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A. N.; DOUZET, J. M.; FELLER, C.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 187-195, 2010.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; AS, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, n. 4, p. 755-775, 2002a.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 241, n. 2, p. 155-176, 2002b.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. 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.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Matéria orgânica em um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1113-1120, 2003.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A.; BUZETTI, S. Alterações nas frações do carbono em um Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 3, p. 305-311, 2006.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: Genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York: John Wiley e Sons, 1994. 496p.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (eds). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society American, 1996. cap. 35, p. 1011-1020.

WALKLEY, A.; BLACK, A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Philadelphia, v.37, n.1, p.29-38, 1934.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1930-1946, 2002.

ZHONGKUI, L.; WANG, E.; SUN, O. J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 3-4, p. 211-223, 2010.

ZOTARELLI, L. **Influência do sistema de plantio direto e convencional com rotação de culturas na agregação, acumulação de carbono e emissão de óxido nitroso num latossolo vermelho distroférico**. 2005. 117 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

3 CAPÍTULO 1: ESTOQUE DE CARBONO, ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO COM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ, BRASIL¹

3.1 RESUMO

O objetivo do presente estudo foi avaliar os teores e estoques de carbono, atributos químicos e físicos do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação na região Oeste do Paraná, Brasil. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições, sendo estudadas áreas com diferentes tempos de adoção do sistema plantio direto (SPD): 6 anos (fase de transição), 14 anos (fase de consolidação) e 22 anos (fase de manutenção) no sistema de sucessão de culturas de soja (verão) e milho/trigo (inverno) (SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente); 12 anos de SPD no mesmo sistema de sucessão e mais 4 anos com introdução de braquiária em consórcio com o milho nos cultivos de inverno (fase de consolidação) - (M+B); área de pastagem permanente e mata nativa, todas sob Latossolo Vermelho Eutroférico de textura muito argilosa. Os atributos químicos e físicos, os teores e estoques de carbono (ECOT) e o índice de estratificação (IE) foram avaliados nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m. Os maiores valores para macroporosidade foram observados na área de mata, variando de 0,23 a 0,30 m³ m⁻³, sendo a microporosidade superior nas áreas cultivadas. As áreas de M+B e SPD₂₂ apresentaram menor relação macroporos/volume total de poros (MA/VTP). Tanto para a densidade do solo, quanto para a resistência à penetração, as áreas manejadas apresentaram valores superiores, o que sugere a ocorrência de camadas subsuperficiais compactadas. A área de mata apresentou teores de carbono orgânico total superiores nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, alcançando 40,78 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 m. Observa-se variação negativa nos ECOT nas áreas manejadas em relação à área de mata, sendo mais evidente nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m. O IE foi superior a um, verificando-se elevação em função do tempo de adoção do SPD, especialmente entre as áreas de SPD₆ e SPD₁₄. Verifica-se maior compactação do solo nas áreas manejadas, e o SPD no sistema de sucessão soja, milho/trigo contribui de forma lenta e gradual para o aumento dos estoques de carbono orgânico do solo.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Acúmulo de carbono. Sucessão de culturas.

¹ Capítulo publicado na forma de artigo na Revista Semina: Ciências Agrárias, v.35, n.6, p.3053-3072, 2014.

3.2 ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the organic carbon stocks and chemical and physical properties of soil in management systems with different deployment times under clayey Red Latosol in the western region of Paraná, Brazil. Five managed areas and a reference area (native forest) without anthropic action were analyzed in a completely randomized design with five replications. Management systems include three areas with different time of first adoption of the no-till: 6 years – NT₆ (transition phase), 14 years – NT₁₄ (consolidation phase) and 22 years – NT₂₂ (maintenance phase) under continuous soybean–maize or wheat cropping system; 12 years of no-till under soybean-maize or wheat cropping system, and in the last four years with integration of maize and ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*) (consolidation phase) – (NT+B) and an area of permanent and continuous extensive cattle pasture of coast-cross (*Cynodon dactylon*). Soil physical and chemical properties, total soil organic carbon (TOC) stock and carbon stratification index (SI) were evaluated at depths from 0-0.05; 0.05-0.1; 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m. The macroporosity (MA) was higher in the native forest area, ranging from 0.23 to 0.30 m³ m⁻³ and the microporosity (MI) was higher in cultivated areas. The areas of NT+B and NT₂₂ presented lower macroporosity/total pore volume ratio (MA/TPV). For soil bulk density (BD) and soil penetration resistance, the managed areas show higher values, suggesting the occurrence of compacted subsurface layers. Native forest area showed the highest TOC levels in the depths 0-0.05 and 0.05-0.1 m, reaching 40.78 g kg⁻¹ in the 0-0.05 m soil layer. There was negative change on TOC stocks in the managed areas compared to the native forest area, being more evident in the surface layers of 0-0.05 and 0.05-0.10 m. The carbon SI was greater than one; however, there was increase due to the adoption time of the no-till, especially between the NT₆ and NT₁₄ areas. There was higher soil compaction in the managed areas, and the NT under continuous soybean, maize or wheat cropping system contributed slowly and gradually to the increase of TOC stocks.

Key words: No-till. Carbon accumulation. Crop succession.

3.3 INTRODUÇÃO

Nos solos tropicais, a matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais atributos responsáveis pela manutenção da sua qualidade, e o monitoramento dos teores de carbono (C) pode identificar mudanças nos sistemas de manejo adotados em relação à qualidade e

quantidade desta fração orgânica (CARTER, 2002).

Nos agroecossistemas, a quantidade de carbono orgânico total (COT) armazenada é resultado do equilíbrio entre as entradas de C, principalmente a partir de resíduos de culturas, e as perdas de C resultantes da decomposição da MOS (ÁLVARO-FUENTES; EASTER; PAUSTIAN, 2012). O acúmulo de C anual pode apresentar elevada variabilidade entre regiões, principalmente pela diversidade de clima (temperado, subtropical e tropical), solos, tipos de manejos e rotações de culturas adotadas em relação às áreas sob vegetação natural (MARRIOTT; WANDER, 2006). Desta forma, o teor de C pode permanecer estável, aumentar ou diminuir em relação ao sistema natural (FRAZÃO et al., 2010).

Teores adequados de MOS, além de manter a fertilidade do solo, minimizam os impactos das práticas agrícolas sobre o meio ambiente devido ao sequestro de C (BERNOUX et al., 1999). A adoção de manejos do solo que minimizem seu revolvimento, aumentam as entradas de C e reduzem as taxas de decomposição e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, conseqüentemente elevam os estoques de COT (KRAGT et al., 2012), sendo assim, consideradas importantes opções de mitigação ao aquecimento global (CERRI et al., 2011). Desta forma, estudos em diferentes sistemas de manejo cultivados são fundamentais para o entendimento da dinâmica do C no solo (BERNOUX et al., 1999).

Além dos estoques de C, o cultivo do solo pode alterar alguns atributos físicos tais como: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt) e a distribuição de poros por tamanho em relação ao solo não cultivado (BERTOL et al., 2004). Alguns desses atributos estão associados à estabilidade estrutural do solo, como a Ds (STONE; SILVEIRA, 2001), resistência à penetração (Rp) (BEUTLER; CENTURION, 2004) e Pt (OLIVEIRA et al., 2004), desta forma, sendo utilizados para avaliar os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo. Em sistemas de manejo de longa duração sem revolvimento do solo, como o sistema plantio direto (SPD) e pastagens permanentes, quando não manejados corretamente, tem sido detectada a redução do volume de macroporos e aumento da Ds (BERTOL et al., 2001).

A adoção de práticas conservacionistas, como o SPD aumentou consideravelmente durante as últimas décadas (DIMASSI et al., 2013). Ao comparar áreas de SPD com 4, 8 e 12 anos de implantação e área em plantio convencional (com 12 anos), Marcolan e Anghinoni (2006) observaram que após 4 anos sob SPD, o solo havia recuperado sua condição original para os atributos físicos: Ds, macro, micro e Pt. Com relação aos atributos químicos, sistemas manejados de forma correta, podem promover aumento nos teores e estoques de COT (PLAZA-BONILLA; CANTERO-MARTINEZ; ÁLVARO-FUENTES, 2010), além do incremento nos teores das bases trocáveis e fósforo, principalmente nas camadas superficiais, com o decorrer

do tempo de implantação do sistema (DALCHIAVON et al., 2012). Além disso, tem-se obtido relações significativas entre o tempo de adoção do SPD e estoques de C do solo (UMAKANT; USSIRI; LAL, 2010).

Uma das estratégias utilizadas para avaliar as alterações do solo em decorrência do tipo de uso e de técnicas de manejo, é a avaliação dos atributos comparando solos manejados com aqueles sem manejo, sob vegetação natural (BARROS; COMERFORD, 2002). Desta maneira, o objetivo desse estudo foi avaliar as variações nos teores e estoques de carbono orgânico total, os atributos químicos e físicos do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação sob Latossolo Vermelho Eutroférico na região Oeste do Paraná.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo

Foram coletadas amostras de terra em sistemas de manejo explorados comercialmente, com diferentes tempos de implantação, e conduzidos em propriedades rurais no município de Guaíra, Oeste do Paraná, Brasil (Figura 1).

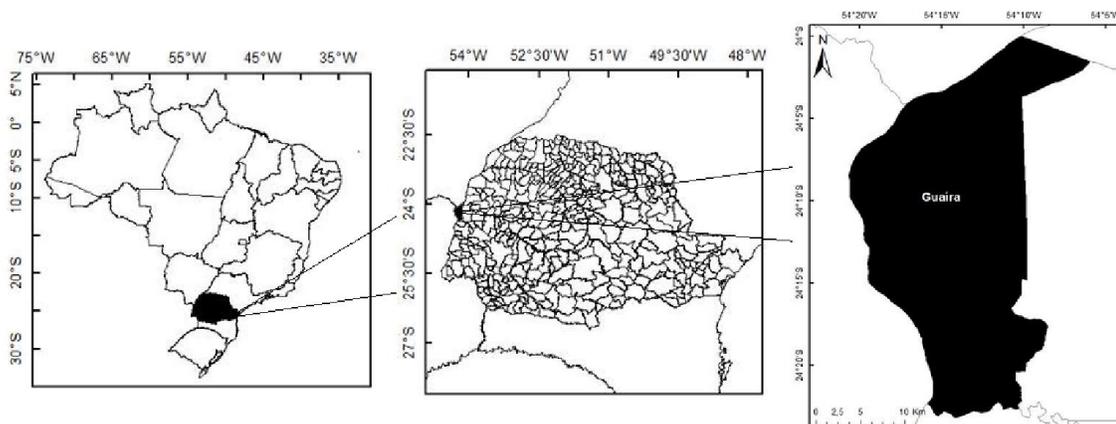


Figura 1 - Localização do município de Guaíra-PR.

O clima da região é subtropical (Cfa), segundo classificação de Köppen (CAVIGLIONE et al., 2000). Valores médios de precipitação pluviométrica, temperaturas máximas, médias e mínimas e umidade relativa mensais da região de estudo no período entre 1973 e 2011 constam na figura 2. Segundo levantamento detalhado de solos do estado do Paraná (EMBRAPA, 2007), as áreas do estudo se encontram sob Latossolo Vermelho Eutroférico típico, textura muito argilosa (EMBRAPA, 2013).

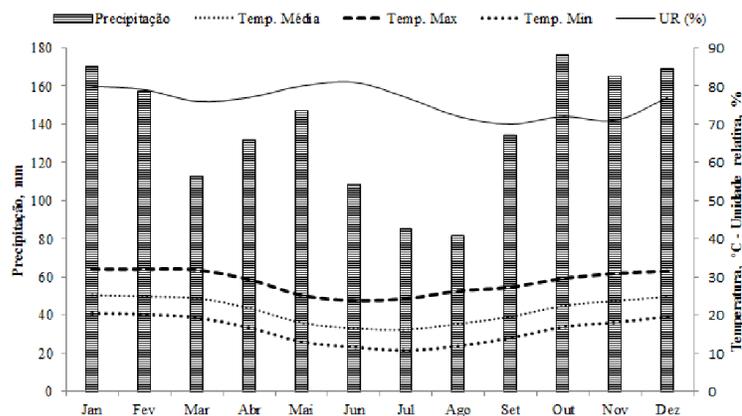


Figura 2 - Valores médios mensais de precipitação pluviométrica, temperaturas médias, máximas e mínimas e umidade relativa no período compreendido entre 1973 a 2011. Fonte: Estação Meteorológica – IAPAR – Unidade de Palotina (24° 18' S; 53° 55' W, Palotina, PR).

3.4.2 Sistemas Avaliados e Histórico de Uso

Foram avaliadas cinco áreas manejadas além de uma área de referência (Mata Nativa) sem ação antrópica, perfazendo seis sistemas diferenciados analisados em delineamento inteiramente casualizado. As cinco áreas manejadas compreendem: áreas com diferentes tempos de adoção do SPD: 6 anos (fase de transição) - (SPD₆), 14 anos (fase de consolidação) - (SPD₁₄) e 22 anos (fase de manutenção) - (SPD₂₂) com a sucessão de culturas de soja (verão) e milho/trigo (inverno); 12 anos de SPD no mesmo sistema de sucessão e mais 4 anos com introdução de *Brachiaria ruziziensis* em consórcio com o milho nos cultivos de inverno (fase de consolidação) - (M+B) (ANGHINONI, 2007) e área de pastagem permanente coast-cross (*Cynodon dactylon*) (39 anos), com lotação de animais de 3,5 UA ha⁻¹, com ausência de sinais visíveis de degradação (Figura 3). A descrição detalhada das áreas é apresentada na tabela 1.

Todas as áreas após a conversão do SPC para SPD foram cultivadas em sucessão de culturas, soja (verão) e milho/trigo (inverno), com exceção da área de consórcio M+B, na qual a *Brachiaria ruziziensis* foi introduzida no sistema nos últimos quatro anos com o intuito de maior produção de palhada para o cultivo da soja subsequente. Em todas as áreas de SPD, as adubações utilizadas nos últimos cinco anos de cultivo em sucessão das culturas de soja, milho/trigo foram de 270 kg ha⁻¹ de 02-20-18 e inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* (inoculante líquido: 150 mL para cada 50 kg de sementes) e 270 kg ha⁻¹ de 10-15-15, respectivamente, além da aplicação de calcário a cada quatro anos, na dose de 1,7 Mg ha⁻¹, com exceção da área de SPD₁₄, que após a conversão do sistema de semeadura (SPC/SPD - 1998), não recebeu práticas de correção do solo. Na área cultivada com pastagem permanente não

foram realizadas práticas de correção ou adubação durante todo o período em que a espécie ficou instalada na área.

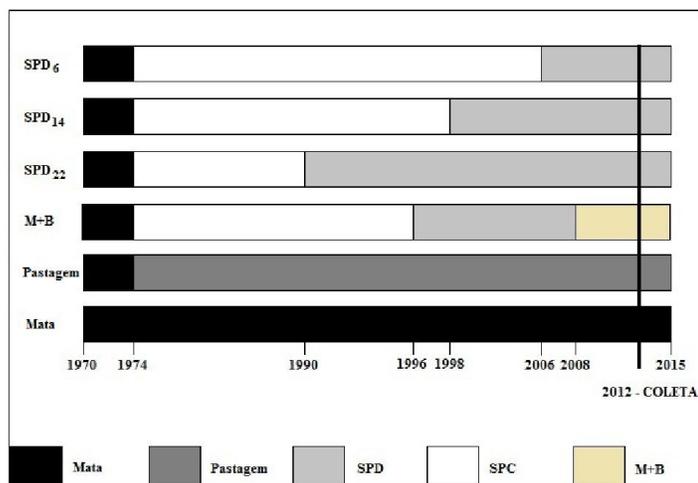


Figura 3 - Histórico dos usos e mudanças do uso das áreas, com as respectivas datas de implantação em cada sistema de manejo: SPD: sistema plantio direto; SPC: sistema de preparo convencional; M+B: sistema plantio direto em consórcio com *Brachiaria*.

Tabela 1 - Histórico, descrição e localização das áreas de estudo (sistemas de manejo)

Sistema de manejo	Descrição
SPD ₆	20 ha; 270 m de altitude, 24°09'092'' Sul (S) e 54°13'368'' Oeste (O), (Fase de transição, com seis anos em SPD). Proprietário: Airton Groff.
SPD ₁₄	17 ha; 298 m de altitude, 24°09'938'' S e 54°14'190'' O. (Fase de consolidação, com 14 anos em SPD). Proprietário: Isac Sérgio Rosset.
SPD ₂₂	77 ha; 297 m de altitude, 24°15'454'' S e 54°10'361'' O. (Fase de manutenção, com 22 anos em SPD). Proprietário: Maury Luiz Lovera.
SPD ₁₂ Milho+ <i>Brachiaria</i> (M+B) ₄ – (M+B)	20 ha; 281 m de altitude, 24°09'136'' S e 54°13'676'' O. Com 12 anos em SPD em sucessão soja, milho/trigo e últimos quatro anos consórcio milho e <i>Brachiaria ruzizensis</i> nos cultivos de inverno (Fase de consolidação) – (16 anos no total). Proprietário: Mauro Ito.
Pastagem	2 ha; 302 m de altitude, 24°11'025'' S e 54°12'449'' O; permanente com coast-cross (<i>Cynodon dactylon</i>). Proprietário: Isac Sérgio Rosset.
Mata	2 ha; Área sob vegetação nativa (Mata Atlântica – Floresta Estacional Semidecidual), 295 m de altitude, 24°11'029'' S e 54°11'898'' O, utilizada como referencial. Proprietário: Isac Sérgio Rosset

3.4.3 Coleta de Amostras de Terra

Em cada área de estudo foram demarcadas cinco glebas de 400 m², nas quais foram realizadas as coletas das amostras de terra, cada gleba representou uma repetição. As amostras foram coletadas em cinco pontos (glebas-repetições), sendo que, cada amostra composta foi representada por dez amostras simples dentro dos seis sistemas de manejo, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1-0,1-0,2 e 0,2-0,4 m. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). Também foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de anel volumétrico com volume de 46,2 cm³ com cinco repetições em todas as áreas e camadas.

3.4.4 Análises Realizadas

a) Análises físicas

As análises granulométricas (método da pipeta), densidade de partículas (Dp), argila dispersa em água (ADA) com posterior cálculo do grau de floculação (GF), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macro e microporosidade pelo método do anel volumétrico em mesa de tensão foram realizadas segundo metodologia descrita por Embrapa (1997). A partir dos resultados da Pt, foi calculada a relação macroporos/volume total de poros (MA/VTP) (TAYLOR; ASHCROFT, 1972). A resistência do solo à penetração (Rp) e a umidade volumétrica foram quantificadas em amostras saturadas e após 24 horas em mesa de tensão (capacidade de campo), com a utilização de penetrógrafo de bancada modelo MA-933. Estas análises foram realizadas nos laboratórios de Física do Solo da Universidade Estadual do Oeste do Paraná e de Manejo e Conservação do Solo da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.

b) Análises químicas

As análises químicas de rotina foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. O pH foi determinado em solução de CaCl₂ (relação solo: solução 1:2,5); Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, sendo o Al³⁺ determinado por titulação com NaOH 0,015 mol L⁻¹ e o Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados por espectroscopia de absorção atômica (EAA); P e K⁺ extraídos por solução Mehlich-1, sendo o P determinado por colorimetria, e o K⁺ por fotometria de chama, e a acidez potencial (H⁺Al) extraída com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ tamponado a

pH 7,0, determinada por titulação com NaOH 0,1 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 2009).

c) Carbono orgânico total e estoques de carbono

O carbono orgânico total (COT) foi determinado através de combustão seca por analisador CHNS (Elementar Analysensysteme GmgH, Alemanha) no Laboratório de Gênese e Classificação de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. A partir dos resultados obtidos, foram calculados os estoques de carbono orgânico total (ECOT) segundo o método da massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995; SISTI et al., 2004) apresentado na equação (1). Para verificar tendências de acúmulo ou perda de COT em comparação com o sistema de referência (mata nativa), foi calculada a variação do ECOT (Δ ECOT, Mg ha⁻¹ cm⁻¹) em comparação à mata, sendo esse obtido pela diferença entre os valores médios de ECOT neste sistema (referência) e em cada um dos demais. O valor obtido foi dividido pela espessura (cm) de cada camada.

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_{ti} + \left[M_{tn} - \left(\sum_{i=1}^n M_{ti} - \sum_{i=1}^n M_{si} \right) \right] * C_{tn} \quad (1)$$

onde:

C_s = estoque de C total, corrigido em função da massa de solo de uma área de referência (no texto representado como ECOT);

$$\sum_{i=1}^{n-1} C_{ti} = \text{somatório dos estoques de C do solo da primeira à última camada amostrada}$$

no tratamento considerado (Mg ha⁻¹);

M_{tn} = massa de solo da última camada amostrada no tratamento (Mg ha⁻¹);

$$\sum_{i=1}^n M_{ti} = \text{somatório da massa total do solo amostrado sob o tratamento (Mg ha⁻¹);}$$

$$\sum_{i=1}^n M_{si} = \text{somatório da massa total do solo amostrado na área referência (Mg ha⁻¹);}$$

C_{tn} = teor de C do solo na última camada amostrada (Mg C Mg⁻¹ de solo).

Com os resultados de COT, calculou-se também o índice de estratificação do carbono (IE) mediante relação entre os teores de COT da camada de 0-0,05 m em relação a camada de

0,1-0,2 m (camada arável) conforme proposto por Franzluebbbers (2002). Valores superiores a um indicam acúmulo de C na superfície, sendo maior quanto mais distante da unidade, indicando assim, melhor qualidade do solo. A existência de valores inferiores a um, indica que o sistema está perdendo qualidade.

Para o cultivo de inverno de 2012, após a colheita do milho, foi realizada a amostragem do material vegetal acumulado sobre o solo utilizando-se um gabarito de 0,25 m², em dez repetições, para as seis áreas estudadas. A fim de estimar a quantidade de material vegetal aportado sobre a superfície do solo, foram coletadas a palhada proveniente das culturas nas áreas sob SPD, folhas, galhos finos e grossos à superfície do solo na área de mata e resíduos das gramíneas na área de pastagem.

3.4.5 Análises Estatísticas

Os resultados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados por meio dos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, em delineamento inteiramente casualizado, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F, e os valores médios foram comparados entre si pelo teste de Tukey a 5% com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2006).

Como análise complementar, foi utilizada a técnica multivariada por meio da análise canônica, envolvendo todas as variáveis em estudo (químicas, físicas e estoque de carbono), a partir da qual foi reduzido o conjunto de dados em combinações lineares, gerando os escores das duas primeiras variáveis canônicas que explicam mais de 80% da variação total (CRUZ; REGAZZI, 1994), sendo os escores projetados em gráficos bidimensionais. Além dessa técnica, foi ainda utilizado o método de agrupamento de Tocher modificado, com o propósito de discriminar os tratamentos que apresentaram maior similaridade, e também para agrupar os diferentes tipos de manejo a partir da matriz de distância generalizada de Mahalanobis. O gráfico com base na análise canônica foi gerado e os grupos formados por meio do agrupamento de Tocher modificado, utilizando o programa GENES (CRUZ, 2006).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Atributos Físicos

Na Tabela 2 pode-se observar que todas as áreas possuem teores de argila acima de 600 g kg⁻¹, sendo classificadas como de textura muito argilosa. Na camada de 0-0,05 m,

verificou-se valores superiores para o grau de floculação (GF) nas áreas de pastagem e mata, 85 e 86%, respectivamente, diferindo das áreas de SPD₆ e M+B. Com exceção da camada de 0-0,05 m para a área sob SPD₁₄, as áreas de SPD₁₄ e SPD₂₂ foram semelhantes à mata para a argila dispersa em água (ADA). Estes dois indicadores interferem no grau de agregação do solo (EMBRAPA, 1997).

Tabela 2 - Análise granulométrica (areia, silte e argila), argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF) e densidade de partículas (Dp) nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistema de manejo	Areia	Silte	Argila	ADA	GF	Dp
	-----g kg ⁻¹ -----				%	g cm ⁻³
0-0,05 m						
SPD ₆	170	216	614	152a	75b	2,77a
SPD ₁₄	145	186	669	152a	77ab	2,76a
SPD ₂₂	101	276	623	102abc	84ab	2,77a
M+B	173	209	618	146ab	76b	2,80a
Pastagem	86	292	623	90bc	85a	2,79a
Mata	118	265	617	86c	86a	2,72b
CV(%)				23,6	5,7	0,9
0,05-0,1 m						
SPD ₆	167	220	613	152a	75a	2,79ab
SPD ₁₄	145	157	698	164a	76a	2,78ab
SPD ₂₂	101	271	628	120a	81a	2,79ab
M+B	170	210	619	151a	76a	2,82a
Pastagem	87	293	620	142a	77a	2,80a
Mata	125	256	620	112a	82a	2,74b
CV(%)				23,2	6,8	1,0
0,1-0,2 m						
SPD ₆	142	202	657	191a	71b	2,81a
SPD ₁₄	126	150	724	169abc	77ab	2,82a
SPD ₂₂	92	267	641	131bc	80a	2,80a
M+B	157	218	626	185ab	71b	2,84a
Pastagem	86	300	614	153abc	75ab	2,83a
Mata	104	282	614	123c	80a	2,76a
CV(%)				18,7	5,4	2,8
0,2-0,4 m						
SPD ₆	124	209	667	163b	76a	2,82a
SPD ₁₄	104	141	755	183ab	76a	2,84a
SPD ₂₂	81	256	663	145b	78a	2,82a
M+B	129	227	645	186ab	71ab	2,84a
Pastagem	74	227	700	228a	68b	2,84a
Mata	97	196	707	161b	77a	2,80a
CV(%)				16,1	4,9	2,8

Médias seguidas de letras iguais na coluna em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Em todos os sistemas de manejo e camadas, os valores de D_p variaram de 2,72 a 2,84 g cm^{-3} , valores semelhantes àqueles obtidos por Lourente et al. (2011) sob Latossolo Vermelho Distroférrico típico em Mato Grosso do Sul. Observa-se valor inferior para a D_p principalmente na camada de 0-0,05 para a área de mata, diferindo das demais áreas. Para as camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m não houveram diferenças nos valores de D_p entre as áreas estudadas. Um fator que contribui para a redução da D_p é o teor de MOS do solo (BRADY; BUCKMAN, 1983).

Para a macroporosidade, foram observados em todas as camadas, valores superiores na área de mata, variando de 0,23 a 0,30 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, com exceção para a área de SPD₆ na camada de 0-0,05 m, que apresentou resultado semelhante à área de mata (Tabela 3). Foi observada tendência de redução da macroporosidade em profundidade, especialmente nas áreas manejadas em SPD, chegando a de 0,08 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0,1-0,2 m na área de SPD₆. A mesma tendência em redução da macroporosidade em áreas manejadas também foi evidenciada por Torres, Fabian e Pereira (2011) em áreas de SPD e pastagem permanente, em comparação com área de vegetação natural no estado de Minas Gerais.

Apesar de não terem sido obtidas diferenças para a camada de 0-0,05 m nas áreas de SPD₁₄ e SPD₂₂, houve uma tendência de diminuição na macroporosidade em função do tempo de implantação do SPD. O mesmo se observa para os valores de microporosidade, porém com aumento dos valores na camada de 0-0,05 m, sendo superiores aos valores da área de mata (Tabela 3). Segundo Viana et al. (2011) a drástica redução da macroporosidade nos solos cultivados decorre da maior intensidade de compactação pelo tráfego intensivo de máquinas. Com relação a P_t , não foram verificadas diferenças na camada de 0-0,05 m nas áreas avaliadas. Para as demais camadas, observam-se maiores valores na área de mata, não diferindo da área de pastagem nas três primeiras camadas, e M+B na última camada avaliada.

Em todas as camadas, as áreas sob M+B e pastagem apresentaram valores da relação MA/VTP inferiores a 0,33 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Tabela 3), valor mínimo, considerado ideal para o desenvolvimento das culturas (TORRES; FABIAN; PEREIRA, 2011). Para os diferentes tempos de adoção do SPD foram observados valores inferiores nas camadas subsuperficiais, chegando a 0,18 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para o SPD₂₂ nas camadas de 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, e de 0,17 e 0,16 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para a área de SPD₆ nas camadas de 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. Esse padrão difere do observado da área de mata, onde os valores dessa relação variaram de 0,42 a 0,52 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, sendo superior às áreas manejadas nas quatro camadas avaliadas. Na camada de 0-0,05 m, com a redução dos macroporos e elevação nos microporos devido ao aumento do tempo de adoção do SPD ocorreu diminuição da relação MA/VTP.

Tabela 3 - Porosidade (macro, micro e total), relação macroporos/volume total de poros, densidade, resistência à penetração e umidade do solo nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistema de manejo	Porosidade do solo (m ³ m ⁻³)			Relação MA/VTP	Densidade (Mg m ⁻³)	Resistência à penetração (MPa)		Umidade θ (cm ³ cm ⁻³)	
	Macro	Micro	Total			Rps	Rp ₂₄	UM _s	UM ₂₄
0-0,05 m									
SPD ₆	0,23ab	0,36b	0,59a	0,39b	1,22a	0,34c	0,79b	0,57a	0,36b
SPD ₁₄	0,20bc	0,39ab	0,59a	0,34c	1,21a	0,41bc	0,69b	0,57a	0,39ab
SPD ₂₂	0,19bc	0,40ab	0,59a	0,32cd	1,15a	0,60b	0,82b	0,58a	0,40ab
M+B	0,14bc	0,37ab	0,51a	0,27de	1,30a	1,25a	1,63a	0,49a	0,37ab
Pastagem	0,14c	0,42a	0,56a	0,25e	1,15a	1,34a	1,53a	0,54a	0,43a
Mata	0,30a	0,27c	0,57a	0,52a	0,80b	0,08d	0,29c	0,56a	0,27c
CV (%)	23,6	8,3	7,6	7,2	8,3	14,6	8,5	7,9	8,4
0,05-0,1 m									
SPD ₆	0,12b	0,39a	0,51bc	0,24bc	1,46a	0,88b	1,51cd	0,50b	0,39a
SPD ₁₄	0,13b	0,39a	0,52bc	0,25b	1,42a	1,10b	1,30d	0,50b	0,38ab
SPD ₂₂	0,09b	0,41a	0,50c	0,18d	1,37ab	1,78a	2,09a	0,49b	0,41a
M+B	0,10b	0,41a	0,51bc	0,20cd	1,46a	1,51a	1,79b	0,50b	0,41a
Pastagem	0,15b	0,41a	0,56ab	0,27b	1,20b	0,84b	1,58bc	0,54ab	0,41a
Mata	0,26a	0,33b	0,59a	0,44a	0,99c	0,25c	0,64e	0,57a	0,33b
CV (%)	29,6	7,6	5,2	8,5	8,1	15,8	9,2	5,6	7,7
0,1-0,2 m									
SPD ₆	0,08c	0,41a	0,49c	0,17c	1,53a	1,39b	1,53b	0,48c	0,41a
SPD ₁₄	0,12bc	0,40a	0,52bc	0,23b	1,38b	1,09c	1,31b	0,51bc	0,40a
SPD ₂₂	0,09bc	0,40a	0,49c	0,18c	1,37b	1,61a	1,82a	0,48c	0,40a
M+B	0,09bc	0,41a	0,50c	0,18c	1,47ab	1,62a	1,91a	0,49c	0,41a
Pastagem	0,15b	0,39a	0,54ab	0,27b	1,23c	0,97c	1,50b	0,53ab	0,40a
Mata	0,25a	0,33b	0,58a	0,43a	1,11c	0,30d	0,89c	0,56a	0,33b
CV (%)	22,7	5,7	3,7	7,1	4,8	10,1	9,8	3,8	5,5
0,2-0,4 m									
SPD ₆	0,09b	0,44a	0,53b	0,16d	1,44a	0,96b	1,13b	0,52a	0,45a
SPD ₁₄	0,12b	0,41ab	0,53b	0,22bc	1,37ab	0,89bc	1,24b	0,52a	0,41ab
SPD ₂₂	0,11b	0,41ab	0,52b	0,20c	1,28bc	0,77cd	1,08b	0,51a	0,42ab
M+B	0,11b	0,43ab	0,54ab	0,21c	1,49a	1,46a	1,63a	0,53a	0,43ab
Pastagem	0,13b	0,40b	0,53b	0,24b	1,23bc	0,69d	1,21b	0,51a	0,40b
Mata	0,23a	0,33c	0,56a	0,42a	1,12c	0,26e	0,75c	0,53a	0,33c
CV (%)	16,3	5,8	3,0	6,9	6,3	9,9	7,4	5,5	5,9

Médias seguidas de letras iguais na coluna em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Rps e Rp₂₄: Resistência do solo à penetração em amostras saturadas e após 24 horas em mesa de tensão, respectivamente. UM_s e UM₂₄: umidade do solo em amostras saturadas e após 24 horas em mesa de tensão, respectivamente. CV = coeficiente de variação.

Para a D_s, a área de mata apresentou valores inferiores, diferindo das cinco áreas manejadas, especialmente nas duas primeiras camadas, chegando a 0,80 Mg m⁻³ na camada de 0-0,05 m (Tabela 3). Esse fato deve-se à ausência de qualquer tipo de manejo de solo ou pastoreio animal nessa área, e em razão da vegetação existente, que proporciona elevada presença de raízes. De modo geral, observa-se aumento na D_s das áreas manejadas,

principalmente nas camadas subsuperficiais, atingindo $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ para a camada de 0,1-0,2 m na área SPD₆, fato igualmente verificado por Viana et al. (2011) em áreas cultivadas comparadas com mata nativa sob Latossolo Vermelho no Paraná. Dimassi et al. (2013) em experimento de longa duração (20 anos) sob SPD, encontraram valores de $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 0,1-0,2 m, próximo ao valor de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ considerado crítico para o desenvolvimento das culturas (SILVA; ROSOLEM, 2001).

É possível observar aumento da Rp com a diminuição nos teores de água das amostras (Tabela 3). Nas camadas de 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, foram observados valores superiores para a Rp, de 1,78 e 1,62 MPa para as amostras saturadas e de 2,09 e 1,91 MPa para as amostras na capacidade de campo nas áreas de SPD₂₂ e M+B respectivamente. Para todas as camadas, as áreas manejadas diferiram da área de mata para os valores de Rp nas amostras saturadas e na capacidade de campo. Os valores elevados encontrados nas áreas manejadas podem estar relacionados ao trânsito de máquinas em condição de elevada umidade no solo (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006), sendo agravado pelos altos teores de argila das áreas (Tabela 2). Valores de Rp acima de 2 Mpa, com variação entre diferentes classes texturais, são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular das culturas (TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998).

Os valores de Ds e Rp obtidos evidenciam a presença de camadas compactadas em subsuperfície, o que pode causar impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas implantadas nos sistemas de sucessão e, conseqüentemente, restringir a produtividade das mesmas em épocas de estresse hídrico prolongado, principalmente pela redução do volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas. Nestes casos, o revolvimento mínimo do solo com escarificadores em determinado período de tempo no SPD (QUINCKE et al., 2007) tem beneficiado a descompactação do solo nas camadas subsuperficiais compactadas, entre 0,15 a 0,25 m, como relatado no trabalho de Ferreras et al. (2000). Dimassi et al. (2013) observaram valores de Ds superiores em 4% em áreas que não receberam a descompactação periódica em relação as áreas que receberam tal manejo.

3.5.2 Atributos Químicos

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos atributos químicos das diferentes áreas estudadas. Para o pH, de maneira geral, observam-se valores superiores em todas as camadas para as áreas de mata e pastagem, diferindo das demais áreas nas camadas de 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m. Esse padrão diferiu do observado para a área de SPD₁₄, a qual apresentou valores inferiores em relação a todas as áreas nas quatro camadas avaliadas, fato relacionado à ausência de

correção do solo após a implantação do SPD, no ano de 1998. A acidificação do solo é um processo contínuo, que persiste mesmo após calagem, visto que a decomposição da MOS adiciona íons H^+ ao solo, assim como a troca iônica que ocorre entre as raízes das plantas e os colóides do solo, além das constantes adubações nitrogenadas durante os anos de cultivo. Nesse processo, as plantas absorvem íons Ca^{2+} e Mg^{2+} e outras bases, liberando íons H^+ , aumentando a acidez do solo com o decorrer dos cultivos (BARBOSA FILHO; FAGERIA; ZIMMERMANN, 2005). Estes baixos valores de pH do solo na área de SPD₁₄, justificam os elevados valores de H^+Al nesta área, atingindo o valor de $5,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0,05-0,1 m. Padrão similar foi observado para os teores de Al^{+3} , sendo maior que zero para todas as camadas somente na área de SPD₁₄, variando de 0,1 a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Para o teor de P no solo, apenas para a camada de 0,2-0,4 m não foram verificadas diferenças dos teores nos diferentes manejos. Para a camada de 0-0,05 m, as áreas de SPD₂₂ e M+B apresentaram valores superiores à área de mata. Nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m foram observados teores superiores de P nas áreas sob SPD em comparação com a área de mata, chegando a $38,5 \text{ mg dm}^{-3}$ na área de SPD₁₄. Esse padrão provavelmente pode ser atribuído às adubações fosfatadas realizadas anualmente nos cultivos de soja (verão) e milho/trigo/braquiária (inverno), além da baixa fertilidade natural do solo em relação ao P como observado na área de mata. Maiores teores de P em camadas superficiais também foram observados por Dalchiavon et al. (2012) em áreas de SPD sob Latossolo Vermelho Distroférrico em Mato Grosso do Sul.

Com relação as bases trocáveis, principalmente o Ca^{+2} , observaram-se teores superiores na área sob vegetação de mata, principalmente nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, chegando a $8,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-0,05 m. Latossolos de origem basáltica justificam os teores elevados deste elemento sob condição original (mata nativa) (MOTTA et al., 2002). Resultados similares foram obtidos por Costa et al. (2007) em Latossolo Vermelho distrófico no estado de Mato Grosso do Sul. Para o Mg^{+2} , houve uma tendência da área de SPD₆ apresentar os teores superiores, com valores variando de 1,0 a $1,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas camadas de 0,2-0,4 e 0-0,05 m, respectivamente. Para o K^+ , somente a área de SPD₂₂ diferiu da área de mata apenas na camada de 0-0,05 m com teor de $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Teores superiores de K^+ no solo permitem que possam ser adicionadas menores doses de fertilizantes na adubação ao longo dos anos de cultivo, sem afetar a produtividade das culturas (DALCHIAVON et al., 2012).

Tabela 4 – Valores de pH, fósforo (P), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), carbono orgânico total (COT), e estoque de carbono (ECOT) nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistema de manejo	pH (CaCl ₂)	P mg.dm ⁻³	H+Al	Al	Ca	Mg	K	COT g kg ⁻¹	ECOT Mg ha ⁻¹
-----cmol _c dm ⁻³ -----									
0-0,05 m									
SPD ₆	5,8b	13,4b	2,9b	0,0b	5,5b	1,8a	0,5ab	18,78d	7,76c
SPD ₁₄	5,1c	14,9b	4,3a	0,1a	3,1c	1,0b	0,3bc	20,94d	8,67c
SPD ₂₂	6,0ab	21,8a	3,2b	0,0b	6,3b	1,3ab	0,6a	24,02c	9,91c
M+B	6,0ab	26,6a	2,6b	0,0b	5,6b	1,1b	0,5ab	18,96d	8,09c
Pastagem	6,2ab	10,7b	3,2b	0,0b	2,9c	1,0b	0,3c	31,56b	13,06b
Mata	6,4a	9,7b	2,7b	0,0b	8,6a	1,0b	0,4bc	40,78a	16,91a
CV(%)	3,7	16,9	17,8	25,2	17,5	31,5	21,8	4,87	14,6
0,05-0,1 m									
SPD ₆	5,5b	22,3bc	3,7bc	0,0b	4,2bc	1,2a	0,3abc	15,90d	8,11c
SPD ₁₄	4,8c	38,5a	5,4a	0,5a	2,2c	0,6b	0,2bc	16,76cd	9,14bc
SPD ₂₂	5,5b	28,5ab	4,3ab	0,0b	5,3b	1,1ab	0,4a	18,24bc	10,07abc
M+B	5,5b	20,2bc	3,1cd	0,0b	5,2b	0,7ab	0,3ab	17,32cd	9,03bc
Pastagem	6,4a	9,7cd	2,5d	0,0b	2,0c	0,6b	0,1c	19,60b	11,53ab
Mata	6,3a	6,2d	2,2d	0,0b	7,9a	0,9ab	0,3abc	26,04a	12,62a
CV(%)	4,3	31,3	16,9	26,4	26,0	31,3	32,5	4,87	14,0
0,1-0,2 m									
SPD ₆	5,3b	8,7ab	3,2b	0,0b	3,3bc	1,2a	0,2ab	12,44c	14,61b
SPD ₁₄	4,8c	13,3a	4,5a	0,5a	2,2cd	0,3cd	0,1b	12,72c	15,23b
SPD ₂₂	5,5b	10,0ab	3,8ab	0,0b	4,5ab	0,8b	0,3a	14,76bc	17,24b
M+B	5,3b	10,2ab	3,1bc	0,0b	3,9ab	0,6c	0,2ab	15,82b	17,78ab
Pastagem	6,4a	8,4ab	2,2c	0,0b	1,6d	0,2d	0,1b	19,82a	22,04a
Mata	6,1a	4,8b	2,2c	0,0b	5,3a	0,9b	0,2ab	14,94bc	16,77b
CV(%)	3,7	30,3	15,6	24,1	22,6	19,9	40,9	9,72	12,7
0,2-0,4 m									
SPD ₆	5,5bc	7,9a	2,8ab	0,0b	3,7a	1,0a	0,1b	9,82b	21,13b
SPD ₁₄	4,9d	6,0a	3,8a	0,3a	2,3bc	0,4bc	0,1b	10,42b	21,99b
SPD ₂₂	5,5bc	6,6a	2,7ab	0,0b	4,2a	0,8ab	0,2a	9,90b	22,24b
M+B	5,4c	5,8a	2,7ab	0,0b	3,3ab	0,5bc	0,2a	10,64b	23,61ab
Pastagem	6,5a	6,3a	2,2b	0,0b	1,3c	0,2c	0,1b	11,84a	26,48a
Mata	5,9b	4,7a	2,5ab	0,0b	4,2a	0,6abc	0,2a	10,78b	22,19b
CV(%)	4,1	29,6	24,7	22,5	18,4	37,7	40,7	4,90	7,4

Médias seguidas de letras iguais na coluna, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV = coeficiente de variação.

3.5.3 Teores e Estoque de Carbono Orgânico Total

Para o COT, observou-se tendência de aumento nos teores em função do tempo de adoção do SPD, especialmente entre as áreas de SPD₆ e SPD₂₂ para as duas primeiras camadas, com valores variando de 15,90 a 24,02 g kg⁻¹ nas camadas de 0,05-0,1 e 0-0,05 m, respectivamente (Tabela 4). Os valores obtidos neste trabalho foram inferiores aos observados

por Souza e Alves (2003) em solo de cerrado no Mato Grosso do Sul e Guareschi, Pereira e Perin (2012a) no estado de Goiás, respectivamente com 8 e 3 anos de implantação do SPD, e Boddey et al. (2010) em experimentos de longa duração no Sul do Brasil. Com o mesmo sistema de sucessão de culturas no Sul do Brasil, Sisti et al. (2004) não verificaram significativos acúmulos de COT na camada de 0-0,3 m após 13 anos sob SPD. De maneira geral, foram verificados teores superiores de COT para as áreas de mata, pastagem e SPD₂₂, sendo a área de mata superior nas duas primeiras camadas, chegando a 40,78 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 m, e a área de pastagem nas camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m.

Foram verificados menores teores de COT em profundidade para as áreas estudadas, comportamento similar foi observado por Guareschi, Pereira e Perin (2012b) com o mesmo tipo de solo e sistema de sucessão de culturas (soja no verão e milho no inverno) em áreas com 3, 15 e 20 anos de implantação do SPD no estado de Goiás. A diminuição dos teores de C em profundidade demonstra a contribuição das entradas de C na camada mais superficial em relação às camadas de 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, fato comum em sistemas sem revolvimento intensivo do solo, como do SPD consolidado.

A contribuição dos resíduos culturais entre os cultivos para a MOS foi incipiente, pois as condições climáticas favoreceram a rápida decomposição desses resíduos. Isso indica a importância da utilização de culturas com maior relação C/N para favorecer a formação de palhada, o que reforça a ideia de não haver diferença para os teores de COT nas camadas mais superficiais, principalmente entre as áreas de SPD₆, SPD₁₄ e M+B (Tabela 4), fato também observado por Paul et al. (2013) após quatro anos de sucessão soja-milho. Alguns estudos têm questionado se o SPD proporciona aumento dos estoques de C do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; CHRISTOPHER; LAL; MISHRA, 2009), pois esse aumento também depende da heterogeneidade de culturas instaladas na área. Os baixos valores podem ser explicados pela baixa entrada de C oriundo do manejo adotado na produção agrícola (OGLE; SWAN; PAUSTIAN, 2012). Para condições tropicais brasileiras em áreas de SPD com 20 anos, Oliveira et al. (2004) verificaram maior acúmulo de MOS nas camadas superficiais do solo nos cultivos de soja, milho e arroz.

Para o estoque de carbono orgânico total (ECOT), observam-se valores superiores para as áreas de mata e pastagem na camada de 0-0,05 m, sendo diferentes entre si, e diferindo das áreas manejadas sob SPD, com valores de 16,91 e 13,06 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 4). Para as demais camadas, verificam-se valores semelhantes nas áreas de SPD₂₂ e mata. Para as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, os valores de ECOT tiveram tendência de aumento com o tempo de adoção do SPD, porém não diferiram estatisticamente, com valor máximo de 10,07

Mg ha⁻¹ para a área de SPD₂₂ na camada de 0,05-0,1 m. Esses valores foram inferiores aos encontrados por Guareschi, Pereira e Perin (2012a, 2012b) utilizando o mesmo sistema de sucessão de culturas, variando de 3 a 20 anos de cultivo em SPD no cerrado brasileiro e Boddey et al. (2010) no Sul do Brasil com 17 anos da sucessão em SPD.

Para as duas últimas camadas, houve uma tendência de aumento do ECOT da área sob M+B, porém não diferindo das áreas sob sucessão soja, milho/trigo (Tabela 4). Isso demonstra que, para a condição estudada, após quatro anos de implantação do sistema de consórcio M+B, os teores de C aportados pela palhada e sistema radicular da braquiária não foram suficientes para aumentar os ECOT em relação às áreas de sucessão soja, milho/trigo, apesar de haver diferença na quantidade de matéria seca (MS) entre esses sistemas após o cultivo de inverno (Figura 4). Nesta mesma figura, pode-se observar aporte de MS de 9,58 Mg ha⁻¹ na área de M+B, enquanto as áreas de sucessão soja e milho/trigo variaram de 5,87 a 6,63 Mg ha⁻¹. Ao serem manejados corretamente, os sistemas de integração/consórcio podem beneficiar as entradas de C no sistema, consequentemente aumentar os ECOT e a fertilidade das áreas (BELL; MOORE, 2012), uma vez que a quantidade de resíduos que entra no sistema influencia a taxa de adição de C ao solo (JOHNSTON; POULTON; COLEMAN, 2009). A magnitude desse processo depende da quantidade e também da qualidade dos resíduos aportados sobre a superfície do solo (PAUL et al., 2013), além do tempo de instalação (SALTON, 2005) e condições climáticas (HÉNIN; DUPUIS, 1945; SALTON et al., 2005).

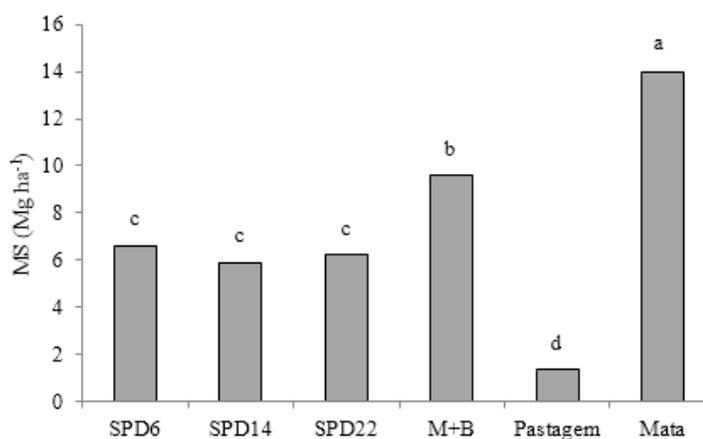


Figura 4 - Quantidade de matéria seca (MS) aportada ao solo após o cultivo de inverno do ano de 2012, nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

As alterações da vegetação, além das práticas de manejo, influenciam os ECOT, pois podem alterar as taxas de adição e perda da MOS (PLAZA-BONILLA; CANTERO-

MARTÍNEZ; ÁLVARO-FUENTES, 2010). Mudanças nos sistemas de manejo têm efeito direto no balanço de C do solo (SALTON et al., 2005). Através da Figura 5, observou-se redução acentuada nos ECOT nas camadas superficiais, especialmente na camada de 0-0,05 m em relação à área de mata, o que indica a maior susceptibilidade da oxidação do COT nesta camada do solo submetidos a certos sistemas de manejo. Mesmo em sistemas de manejo que depositam elevadas quantidades de resíduos sobre a superfície, em regiões tropicais, existe dificuldade em aumentar os teores e ECOT do solo, ou seja, voltar aos níveis das áreas sob vegetação natural (BLAIR, 2000). Essa variação negativa nos ECOT na camada de 0-0,05 m é mais evidente nas áreas de SPD₆ (a), SPD₁₄ (b) e M+B (d), seguidas das áreas de SPD₂₂ (c) e pastagem (e). Virto et al. (2011) mostraram que a variação dos ECOT pode ser positiva ou negativa em função da variação de entradas de C no sistema. Paul et al. (2013) relatam que, pesquisas futuras devem estabelecer para as diferentes zonas climáticas e tipos de solo, os níveis de retenção de resíduos mínimos críticos para a manutenção do C e a conservação do solo.

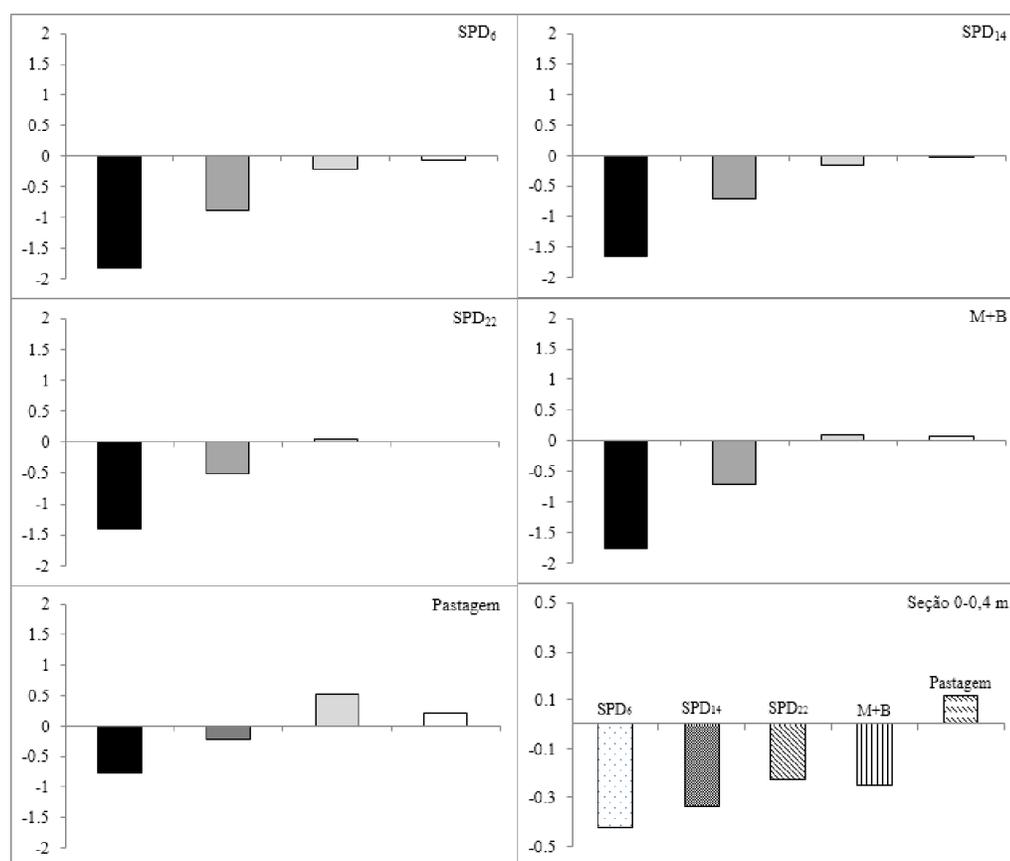


Figura 5 - Variação do estoque de COT (Δ ECOT) das áreas manejadas nas profundidades de 0-0,05 m (■), 0,05-0,1 m (▣), 0,1-0,2 m (▢) e 0,2-0,4 m (□) em relação à área de mata nativa, na região Oeste do estado do Paraná.

Na Figura 5 observa-se que as variações negativas de ECOT foram verificadas em relação à área de mata para todas as camadas avaliadas nas áreas de SPD₆ e SPD₁₄. Sendo que, somente nas camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, as áreas de SPD₂₂, M+B e pastagem apresentaram Δ ECOT nulas ou positivas. No SPD, o potencial em sequestrar C verificado por Corazza et al. (1999) se deu de maneira mais lenta. Neste sistema, um manejo possivelmente mais eficiente dos resíduos incorporados à superfície do solo, além de um esquema de rotação de culturas mais diversificado, pode contribuir para incrementar o desenvolvimento de raízes em profundidade e facilitar o acúmulo de C no perfil do solo. Isso reforça a hipótese de que as características dos esquemas de rotação de culturas podem ser determinantes no comportamento dos sistemas de manejo, principalmente quanto ao sequestro de C (D'ANDRÉA et al., 2004). Padrão esse, evidente nos trabalhos de Boddey et al. (2010); Sisti et al. (2004) inserindo a ervilhaca como mais uma leguminosa componente do sistema na região Sul do Brasil. O aumento da complexidade de rotação, dependendo da região e tipo de solo, pode sequestrar ao redor de 200 kg C ha⁻¹ ano⁻¹ (WEST; POST, 2002).

Para a área de pastagem, foi observado valor negativo de Δ ECOT nas duas primeiras camadas, porém com menor intensidade que as demais áreas avaliadas, principalmente devido à contribuição do sistema radicular da pastagem em acumular C mesmo sem o correto manejo da área, como também relatado por Acharya, Rasmussen e Eriksen (2012), uma vez que a área do estudo está ocupada com pastagem permanente há 39 anos. Para a região dos Cerrados, D'Andréa et al. (2004) verificaram Δ ECOT positiva em áreas de pastagem permanente com *Brachiaria* sp, principalmente devido à renovação contínua do sistema radicular, diferentemente do que ocorre em áreas de pastagens degradadas. Maiores emissões de CO₂ em pastagens degradadas têm sido relatadas quando comparadas com pastagens cultivadas (PLANTE et al., 2011), sendo variável de região para região, assim como influenciada pela quantidade de C que entra no sistema, taxa de decomposição, textura (JOHNSTON; POULTON; COLEMAN, 2009), composição mineralógica do solo e clima (WANG et al., 2010).

Quando foi avaliado a seção de 0-0,4 m, verificou-se tendência de diminuição dos valores negativos de ECOT em relação à área de mata em função do tempo de adoção do SPD, sendo que a área de M+B apresentou variação negativa semelhante à área de SPD₂₂. Diferentes práticas de manejo, incluindo a integração de gramíneas e leguminosas, a melhoria da pastagem, plantio direto e rotação de culturas podem aumentar os ECOT do solo (HUTCHINSON; CAMPBELL; DESJARDINS, 2007).

Com relação ao índice de estratificação (IE), verificou-se variação entre 1,22 e 2,75 nos valores de IE para as áreas de M+B e mata, respectivamente (Figura 6). Outros estudos têm verificado que o valor de IE pode variar de 1,1-1,9 para sistemas de manejo com revolvimento intensivo do solo e 2,1-4,1 para SPD (FRANZLUEBBERS, 2002). Quando se avalia apenas as áreas manejadas, os valores do IE foram crescentes na seguinte ordem: 1,22 (M+B), 1,51 (SPD₆), 1,59 (Pastagem), 1,65 (SPD₁₄) e 1,65 (SPD₂₂). Tormena et al. (2004) estudaram áreas com nove anos de condução sob rotação (milho-trigo-soja-aveia-soja-nabo forrageiro) e sucessão (soja-milho/trigo) de culturas sob Latossolo no estado do Paraná e encontraram valores de IE de 1,73 e 1,28 para essas áreas, respectivamente, ou seja, maior IE em sistema de rotação mais diversificado.

Existe tendência de aumento nos valores de IE com o tempo de adoção do SPD sob sucessão soja, milho/trigo, e isso se deve ao acúmulo de C na camada de 0-0,05 m ocorrer, mesmo que de maneira lenta, como pode ser observado na Tabela 4, onde não se tem diferenças nos teores de COT entre as áreas de SPD₆ e SPD₁₄ nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m. Na área sob mata, verificou-se valor superior para o IE (2,75), indicando que ocorreu maior acúmulo de C em superfície. Sob vegetação de Cerrado, Salton (2005) observou valor de IE de 3,05, e o autor destacou que a utilização deste indicador possui como vantagem a facilidade de sua obtenção, dependendo apenas de valores para COT em duas camadas de solo, não sendo necessária a utilização de uma área de referência. Apesar de terem ocorrido diferenças nas áreas manejadas somente entre M+B em relação a SPD₁₄, SPD₂₂ e pastagem, foi observado certo grau de estratificação do C em profundidade, com valores superiores a um.

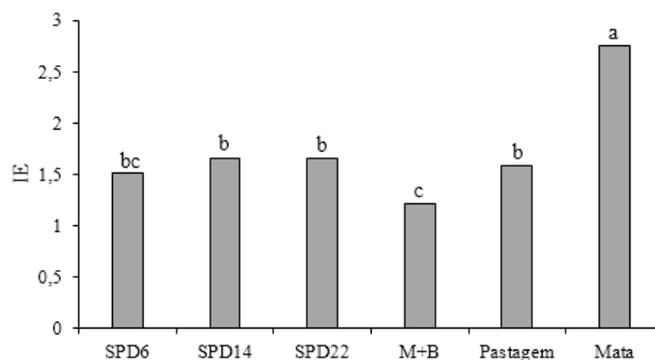


Figura 6 - Índice de estratificação (IE) do carbono orgânico total em função dos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do estado do Paraná.

Na análise canônica dos atributos físicos, químicos e ECOT, a primeira e a segunda variável canônica corresponderam a 71,4 e 21,6% da variação total, respectivamente, representando 93% da variação total, atendendo os requisitos mínimos para avaliação por meio

da dispersão gráfica (CRUZ; REGAZZI, 1994). Além da dispersão gráfica, o método de agrupamento de Tocher modificado foi utilizado, evidenciando a formação de dois grupos: um formado pela área de mata e o segundo grupo formado pelas áreas manejadas de SPD₆, SPD₁₄, SPD₂₂, M+B e pastagem (Figura 7), demonstrando que esses sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação apresentaram padrão similar quando foram considerados os atributos químicos, físicos e estoques de C do solo.

As variáveis de maior importância, ou seja, aquelas que mais contribuíram para discriminar os sistemas de manejo avaliados foram a porosidade total e densidade do solo para os atributos físicos, e os teores de cálcio e estoque de carbono orgânico total para os atributos químicos. Carneiro et al. (2009) evidenciaram em teste de agrupamento para dois tipos de solos, que em ambos, os atributos físicos foram os que menos contribuíram para discriminar os sistemas de manejo avaliados. Com relação à área de mata, os sistemas de manejo provocaram reduções em qualidade de vários atributos estudados, fato também evidenciado por Carneiro et al. (2009) em diferentes sistemas de manejo sob Latossolo e Neossolo sob vegetação de cerrado.

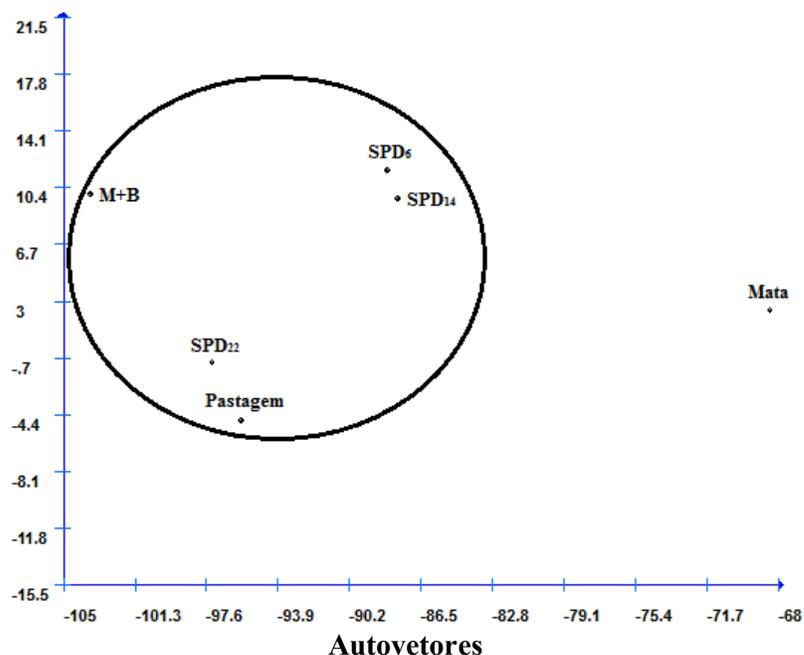


Figura 7 - Dispersão dos diferentes sistemas de uso e manejo e agrupamento pelo método de Tocher modificado das duas primeiras variáveis canônicas em função dos atributos físicos, químicos, teores e estoques de COT em Latossolo Vermelho Eutroférico típico, nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná.

Pelo agrupamento, verificou-se que, de maneira geral, houve igualdade de condições para todas as áreas manejadas, o que leva a crer que os sistemas de manejo, especialmente as

áreas com diferentes tempos de adoção do SPD no esquema de sucessão de culturas (soja-milho/trigo), contribuem de maneira pouco significativa, ou seja, de forma lenta para a melhoria destes atributos comparados com a área de mata, na qual é considerada um referencial para avaliação da qualidade dos sistemas produtivos explorados. Isso pode ser devido principalmente à falta de um sistema de rotação de culturas mais diversificado, envolvendo um maior número de espécies vegetais, com características diferenciadas de aporte de material vegetal quanto à sua quantidade e qualidade, além de diferentes capacidades de exploração em profundidade de seus sistemas radiculares.

3.6 CONCLUSÕES

Nas áreas manejadas verifica-se a presença de camadas compactadas, evidenciadas pelos maiores valores de densidade do solo e resistência à penetração.

A sucessão soja, milho/trigo contribui de forma lenta e gradual para o aumento dos teores e estoques de carbono do solo nos diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto, especialmente nas camadas mais superficiais.

Há variação negativa nos estoques de carbono das áreas manejadas em comparação à área de mata nativa, principalmente nas camadas superficiais do solo.

Nenhum dos sistemas de manejo de longa duração com sistema plantio direto é agrupado com a mata nativa ao serem considerados todos os atributos físicos, químicos e estoque de carbono.

3.7 REFERÊNCIAS

ACHARYA, B. S.; RASMUSSEN, J.; ERIKSEN, J. Grassland carbon sequestration and emissions following cultivation in a mixed crop rotation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 153, n. 15, p. 33-39, 2012.

ÁLVARO-FUENTES, J.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K. Climate change effects on organic carbon storage in agricultural soils of northeastern Spain. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 155, n. 15, p. 87-94, 2012.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. Cap. 6, p. 873-928.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e

incorporada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 507-514, 2005.

BARROS, N. F.; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2002. v. 2. cap. 6, p. 487-592.

BRADY, N. C.; BUCKMAN, H. O. **Natureza e propriedades dos solos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 647 p.

BELL, L. W.; MOORE, A. D. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 111, n. 7, p. 1-12, 2012.

BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; GERALDES, A. P. A.; FERNANDES, S. A. P. Carbono e nitrogênio em solo de uma cronossequência de floresta tropical - pastagem de Paragominas. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1-11, 1999.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-165, 2004.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 183-191, 2000.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 3, p. 693-701, 2008.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; 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**, Illinois, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARTER, M. R. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 38-47, 2002.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD-ROM.

CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 23-28, 2011.

CHRISTOPHER, S. F.; LAL, R.; MISHRA, U. Regional study of no-till effects on carbon sequestration in the midwestern United States. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 1, p. 207-216, 2009.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

COSTA, M. J.; ROSA JUNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SOUZA, L. C. F.; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 29, p. 701-708, 2007. Suplemento.

CRUZ, C. D. **Programa genes: biometria**. Ed. Viçosa: UFV, 2006. 382 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 1994. 394 p.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DIMASSI, B.; COHANB, J. P.; LABREUCHE, J.; MARY, B. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 169, n. 1, p. 12-20, 2013.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2007. 73 p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2009. 628 p.

- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- FERRERAS, L. A.; COSTA, J. L.; GARCIA, F. O.; PECORARI, C. Effects of no tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampa” of Argentina. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1-2, p. 31-39, 2000.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002.
- FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 10, p. 1198-1204, 2010.
- GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Estoque de carbono em Latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo. **Agrária**, Recife, v. 7, n. 4, p. 597-802, 2012a.
- GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 909-920, 2012b.
- HENIN, C.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 15, n. 1, p. 17-29, 1945.
- HUTCHINSON, J. J.; CAMPBELL, C. A.; DESJARDINS, R. L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 2-4, p. 288-302, 2007.
- JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; COLEMAN, K. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 101, n. 1, p. 1-57, 2009.
- KRAGT, M. E.; PANNELL, D. J.; ROBERTSON, M. J.; THAMO, T. Assessing costs of soil carbon sequestration by crop-livestock farmers in Western Australia. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 112, p. 27-37, 2012.
- LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, C. F.; GASPARINI, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011.
- MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 163-170, 2006.
- MARRIOTT, E. E.; WANDER, M. M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 950-959, 2006.

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JÚNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 869-878, 2002.

OGLE, S. M.; SWAN, A.; PAUSTIAN, K. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 37-49, 2012.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

PAUL, B. K.; VANLAUWE, B.; AYUKE, F.; GASSNER, A.; HOOGMOED, M.; HURISSO, T. T.; KOALA, S.; LELEI, D.; NDABAMENYE, T.; SIX, J.; PULLEMAN, M. M. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 164, n. 1, p. 14-22, 2013.

PLANTE, A. F.; FERNÁNDEZ, J. M.; HADDIX, M. L.; STEINWEG, J. M.; CONANT, R. T. Biological, chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 43, n. 5, p. 1051-1058, 2011.

PLAZA-BONILLA, D.; CANTERO-MARTÍNEZ, C.; ÁLVARO-FUENTES, J. Tillage effects on soil aggregation and soil organic carbon profile distribution under Mediterranean semi-arid conditions. **Soil Use Management**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 465-474, 2010.

QUINCKE, J. A.; WORTMANN, C. S.; MAMO, M.; FRANTI, T.; DRIJBER, R. A. Occasional tillage of no-till systems: carbon dioxide flux and changes in total and labile soil organic carbon. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 4, p. 1158-1168, 2007.

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

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** 29. Dourados, 58p, Dezembro, 2005.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 253-260, 2001.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distroférico

de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 133-139, 2003.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and non-irrigated soils**. San Francisco: W.H. Freeman, 1972. 532 p.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1023-1031, 2004.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 301-309, 1998.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 3, p. 437-445, 2011.

UMAKANT, M.; USSIRI, D.; LAL, R. Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 107, n. 2, p. 88-96, 2010.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2105-2114, 2011.

VIRTO, I.; BARRÉ, P.; BURLOT, A.; CHENU, C. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. **Biogeochemistry**, Coverage, v. 108, n. 1-3, p. 17-26, 2011.

WANG, Y.; FU, B.; LÜ, Y.; SONG, C.; LUAN, Y. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China. **Quaternary Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1, p. 70-76, 2010.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1930-1946, 2002.

4 CAPÍTULO 2: FRAÇÕES QUÍMICAS E OXIDÁVEIS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ

4.1 RESUMO

Modificações nos sistemas de manejo a curto prazo podem ser identificadas mediante a sensibilidade das frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo (MOS). O objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade do solo a partir das frações químicas e oxidáveis da MOS em áreas com diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições, sendo estudadas áreas com diferentes tempos de adoção do sistema plantio direto (SPD): 6 anos (fase de transição), 14 anos (fase de consolidação) e 22 anos (fase de manutenção) no sistema de sucessão de culturas de soja (verão) e milho/trigo (inverno) (SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente); 12 anos de SPD no mesmo sistema de sucessão e mais 4 anos com introdução de braquiária em consórcio com o milho nos cultivos de inverno (fase de consolidação) - (M+B); área de pastagem permanente e mata nativa. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m. Foram avaliadas as frações químicas da MOS: ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM), calculando suas respectivas relações, e também as frações oxidáveis (F1, F2, F3 e F4), carbono não lábil (C_{NL}) e suas relações, além do carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (C) das frações húmicas e suas variações em relação à área de mata. Houve aumento nos teores de COT em relação ao tempo de adoção do SPD, principalmente entre SPD₂₂ e SPD₆, passando de 18,78 para 24,02 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 m respectivamente, porém com teor superior na área de mata, 40,78 g kg⁻¹, para a mesma camada, e na área de pastagem nas duas últimas camadas (0,1-0,2 e 0,2-0,4 m). Verificou-se predomínio da fração HUM em relação aos AH e AF, com valor chegando a 72% do COT. Nas áreas manejadas houve movimentação dos AH e AF na seção de 0-0,4 m, chegando a 9,09 e 14,36 Mg ha⁻¹, respectivamente na área de SPD₂₂, porém com contribuição lenta no aumento dos teores e estoques das frações húmicas em função do tempo de adoção do SPD. Verificou-se equilíbrio das frações oxidáveis do C, com maiores teores das frações mais lábeis em superfície. A sucessão de culturas soja, milho/trigo contribui para o aumento da F1, porém não contribui de forma significativa para o aumento das frações mais recalcitrantes do C.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Substâncias húmicas. Carbono lábil.

4.2 ABSTRACT

Changes in short-term management systems can be identified by the sensitivity of chemical and oxidizable fractions of soil organic matter (SOM). The objective of this study was to evaluate the soil quality from chemical and oxidizable organic matter fractions in different management systems under clayey Red Latosol in the western region of Paraná, Brazil. Five managed areas and a reference area (native forest) without anthropic action were analyzed in a completely randomized design with five replications. Management systems include three areas with different time of first adoption of the no-till: 6 years - NT₆ (transition phase), 14 years - NT₁₄ (consolidation phase) and 22 years - NT₂₂ (maintenance phase) under continuous soybean–maize or wheat cropping system; 12 years of no-till under soybean–maize or wheat cropping system, and in the last four years with integration of maize and ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*) (consolidation phase) - (NT+B) and an area of permanent and continuous extensive cattle pasture of coast-cross (*Cynodon dactylon*). Soil samples were collected at depths from 0-0.05; 0.05-0.1; 0.1-0.2 and 0.2-0.4 m. Chemical fractionation of soil organic matter [fulvic acid (FA), humic acid (HA) and humin (H)] and oxidizable fractions (F1, F2, F3 and F4), non-labile carbon, total soil organic carbon (TOC), carbon stock of humic fractions and their changes in relation to native forest area were evaluated. There was increase of TOC levels in relation to the time of adoption of the no-till. The TOC levels in the 0-0.05 m layer increased from 18.78 g kg⁻¹ in the NT₆ system to 24.02 g kg⁻¹ in the NT₂₂ system; however, the highest organic carbon levels were found in the forest area (40.78 g kg⁻¹) and pasture area in the last two layers (0.1-0.2 and 0.2-0.4 m). There was predominance of H fraction compared to HA and FA, with percentage value of 72% of the TOC. In managed areas, there was percolation of HA and FA in the soil section (0-0.4 m), reaching 9.09 and 14,36 Mg ha⁻¹, respectively in the NT₂₂; however, the time of adoption of the no-till contributed slowly and gradually to the increase of levels and stocks of humic fractions. There was balance of oxidizable carbon fractions, with higher contents of labile fractions in surface. The continuous soybean–maize/wheat cropping system contributed to the increase of F1 fraction; however, did not contribute significantly to the increase of the most recalcitrant pools of soil carbon.

Key words: No-till. Humic compounds. Labile carbon.

4.3 INTRODUÇÃO

Na agricultura, após retirada da vegetação natural, podem ser observadas alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, que são dependentes do clima, cultura e práticas de manejo adotadas nos diferentes sistemas de cultivo (MARCHIORI JÚNIOR; MELO, 2000). Sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema plantio direto (SPD), capazes de manter ou até mesmo incrementar frações de carbono orgânico total (COT) no solo, contribuem para manutenção de sua capacidade produtiva e na mitigação da emissão de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (FOLEY et al., 2005).

A compreensão da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) em sistemas de produção, permite subsidiar o estabelecimento de estratégias de manejo que garantam incremento do conteúdo de MOS, qualidade ambiental e do solo ao longo do tempo (ROSSI et al., 2011). Dependendo do tempo de adoção dos sistemas de manejo, em algumas situações não é possível identificar diferenças somente com análise da variação dos teores de COT (BARRETO et al., 2011). A MOS pode ser alterada em maior ou menor intensidade, dependendo do sistema agrícola adotado, sendo um dos atributos mais sensíveis às transformações desencadeadas pelo manejo (BARRETO et al., 2008). Assim, é necessário conhecer o padrão das diferentes frações que compõem a MOS, como o carbono (C) das frações húmicas (BEZERRA et al., 2013) e oxidáveis (RANGEL et al., 2008), para que estes atributos, através da análise dos seus padrões, possam ser utilizados como indicadores de qualidade do solo (BARRETO et al., 2011) e, dessa forma, serem estabelecidas melhores recomendações de uso e manejo.

Grande parte da MOS consiste em série de compostos ácidos não-humificados e macromoléculas humificadas (GUERRA et al., 2008), sendo as substâncias húmicas (SH) com representatividade em torno de 85 a 90% do COT (PINHEIRO; PEREIRA; ANJOS, 2004). A formação das SH é caracterizada por processo complexo baseado na síntese e/ou ressíntese dos produtos da mineralização dos compostos orgânicos que são adicionados ao solo (GUERRA et al., 2008). Vários estudos enfatizam a importância da quantificação do C nas diferentes frações da MOS, devido ao interesse em conhecer o potencial de captura e armazenamento do C nos diferentes sistemas de uso do solo, reduzindo assim o impacto da agricultura sobre o ambiente (BEZERRA et al., 2013; CAMPOS et al., 2013; GREGORICH et al., 2006; LOSS et al., 2013a).

Além das frações húmicas da MOS, as frações oxidáveis, primeiramente propostas por Chan, Bowman e Oates (2001), trazem resultados satisfatórios na interpretação da dinâmica do C no solo. Essas frações são baseadas nos graus de oxidação do C mediante aumento da

concentração de ácido sulfúrico, gerando quatro frações (F1, F2, F3 e F4), sendo as duas primeiras relacionadas à disponibilidade de nutrientes e formação e estabilização de macroagregados (BARRETO et al., 2011), com a F1 de maior labilidade no solo (LOSS et al., 2011). Já as frações F3 e F4 representam compostos de maior estabilidade química e peso molecular, relacionadas às frações humificadas da MOS (RANGEL et al., 2008; STEVENSON, 1994), com grande tempo de permanência no solo (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001).

Um solo de boa qualidade não deve apresentar apenas elevado teor de MOS, necessita também de equilíbrio entre formas estáveis e mineralizáveis da MOS. O acúmulo de C nas frações lábeis e estáveis da MOS apresenta alto dinamismo, e é influenciado pela composição química (relação C/N), aporte de resíduos ao solo, condições climáticas e manejo adotado (ZHONGKUI; WANG; SUN, 2010). Em função do tempo de implantação do SPD, verificam-se modificações nos estoques de C, bem como variações nas frações húmicas (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2013a; LOSS et al., 2013a) e oxidáveis da MOS (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2013b; LOSS et al., 2011).

Em diferentes sistemas de uso do solo, Rossi et al. (2011) e Loss et al. (2013a) verificaram que o C das frações húmicas foi útil para identificar mudanças promovidas pelos diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. Em cronossequência de SPD também na região dos cerrados, Guareschi, Pereira e Perin (2013a,b) verificaram elevada utilidade das frações oxidáveis para avaliar a qualidade dos solos daquela região. Um pequeno número de trabalhos em áreas de cultivo de longa duração sob SPD são encontrados na literatura, em especial com a sucessão de culturas de soja, milho/trigo. Desta maneira, o objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade do solo a partir das frações húmicas e oxidáveis da matéria orgânica em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação sob Latossolo Vermelho Eutroférico na região Oeste do Paraná.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo

A localização da área de estudo está apresentada no item 3.4.1 do Capítulo 1 (pág. 20).

4.4.2 Sistemas Avaliados e Histórico de Uso

A descrição dos sistemas avaliados está apresentada no item 3.4.2 do Capítulo 1 (pág. 21).

4.4.3 Coleta de Amostras de Terra

A descrição da amostragem está apresentada no item 3.4.3 do Capítulo 1 (pág. 23).

4.4.4 Análises Realizadas

Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Gênese e Classificação de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

a) Carbono orgânico total

O COT foi determinado através de combustão seca por analisador CHNS (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Alemanha).

b) Fracionamento químico da matéria orgânica do solo

O fracionamento químico da MOS foi realizado segundo técnica de solubilidade diferencial estabelecida pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (SWIFT, 1996), conforme adaptação por Benites, Madari e Machado (2003), separando as frações em ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HUM), com posterior determinação do teor de C de cada fração mediante oxidação do C por dicromato de potássio em meio sulfúrico sob aquecimento, e titulação por sulfato ferroso amoniacal.

Para tal procedimento, pesou-se uma massa de solo igual a 1,0 g, submetendo-se ao contato com 20 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ por 24 horas. A separação entre o extrato alcalino (EA = C-FAF + C-FAH) e o resíduo (C-HUM) foi feita por centrifugação a 5000 g por 30 minutos. Seguiu-se mais uma lavagem com a mesma solução anterior, juntando-se o extrato com o anteriormente obtido, resultando em volume final de aproximadamente 40 mL. O resíduo foi retirado dos tubos da centrífuga, acondicionados em placa de petri e seco a 65°C (secagem completa). O pH do EA foi ajustado a 1,0 (±0,1) com H₂SO₄ 20%, seguido de decantação por 18 horas em geladeira. O precipitado (C-FAH) foi separado da fração solúvel (C-FAF) por filtragem e ambos os volumes aferidos a 50 mL, com água destilada.

A quantificação do carbono orgânico nas frações C-FAF e C-FAH foi efetuada usando-se alíquotas de 5,0 mL de extrato, 1,0 mL de dicromato de potássio $0,042 \text{ mol L}^{-1}$ e 5,0 mL de H_2SO_4 concentrado, em bloco digestor a 150°C (30 min) e titulação com sulfato ferroso amoniacal $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ na presença de ferroin. No resíduo seco em estufa, foi determinado o C-HUM, adicionando-se 5,0 mL de dicromato de potássio $0,1667 \text{ mol L}^{-1}$ e 10,0 mL de H_2SO_4 concentrado, em bloco digestor a 150°C (30 min) e titulação com sulfato ferroso amoniacal $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ e indicador ferroin.

A partir das análises de C dos AH, AF, extrato alcalino (EA) ($\text{EA} = \text{AH} + \text{AF}$) e HUM, foram calculadas as seguintes relações: AH/AF e EA/HUM para verificação dos processos de humificação da MOS, sendo calculada também a proporção relativa de cada fração em relação ao COT. Além disso, foram calculados os estoques de C das SH, segundo o método da massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995; SISTI et al., 2004). Para verificar tendências de acúmulo ou perda de C das frações húmicas para a seção de 0-0,4 m, foi calculada a variação do estoque de C (EC) de cada fração em comparação à mata (referência) (ΔEC , $\text{Mg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), sendo esse, obtido pela diferença entre os valores médios do estoque de C da fração húmica da referência com cada um dos demais. O valor obtido foi dividido pela espessura (cm) de cada camada.

c) Fracionamento oxidável da matéria orgânica do solo

O fracionamento do COT pelos diferentes graus de oxidação (labilidade), foi efetuado segundo Chan, Bowman e Oates (2001). Amostras de 0,5 g de TFSA foram acondicionadas em erlenmeyer de 250 mL, onde foi adicionado 10 mL $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e quantidades de H_2SO_4 , correspondentes às concentrações de 3, 6, 9 e 12 mol L^{-1} . A oxidação foi realizada sem fonte externa de calor e a titulação dos extratos foi feita com uma solução de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, utilizando-se como indicador a fenantrolina. O fracionamento do carbono produziu quatro frações, com graus decrescentes de oxidação:

- Fração muito facilmente oxidável (F1): C oxidado por $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido com 3 mol L^{-1} de H_2SO_4 ;
- Fração facilmente oxidável (F2): diferença entre o C oxidado por $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido com 6 e 3 mol L^{-1} de H_2SO_4 ;
- Fração moderadamente oxidável (F3): diferença entre o C oxidado por $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido com 9 e 6 mol L^{-1} de H_2SO_4 ;
- Fração resistente (F4): diferença entre o C oxidado por $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido com 12 e 9 mol L^{-1} de H_2SO_4 .

O teor de C na fração F1 foi considerado como carbono lábil (C_L) do solo (RANGEL et al., 2008), enquanto o carbono não-lábil (C_{NL}) foi obtido por diferença ($C_{NL} = COT - C_L$), calculando posteriormente a relação C_L/COT . Visando à obtenção de índices para facilitar a compreensão da dinâmica entre estas frações, calcularam-se também as relações entre as frações F1/F4 e F1+F2/F3+F4.

4.4.5 Análises Estatísticas

Os resultados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados por meio dos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, em delineamento inteiramente casualizado, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F, e os valores médios foram comparados entre si pelo teste de Tukey a 5%, com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2006).

Como análise complementar, foi utilizada a técnica multivariada por meio da análise canônica, envolvendo as variáveis das frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo separadamente, a partir da qual foi reduzido o conjunto de dados em combinações lineares, gerando os escores das duas primeiras variáveis canônicas que explicam mais de 80% da variação total (CRUZ; REGAZZI, 1994), sendo os escores projetados em gráficos bidimensionais. Além dessa técnica, foi ainda utilizado o método de agrupamento de Tocher modificado, com o propósito de discriminar os tratamentos que apresentaram maior similaridade, e também para agrupar os diferentes tipos de manejo a partir da matriz de distância generalizada de Mahalanobis. Os gráficos com base na análise canônica foram gerados e os grupos formados por meio do agrupamento de Tocher modificado, utilizando o programa GENES (CRUZ, 2006).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Carbono Orgânico Total e Carbono e Estoque das Frações Húmicas da Matéria Orgânica do Solo

Para o COT, observou-se aumento nos teores em função do tempo de adoção do SPD, principalmente a área de SPD₂₂ em comparação à SPD₆ nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, e SPD₂₂ e SPD₁₄ na camada de 0-0,05m (Tabela 2). Em função de vários fatores como solo, clima e sucessão de culturas, o aumento do teor de C pode ser lento. Em geral, maiores modificações

são observadas após 10 a 15 anos da conversão do sistema de plantio convencional (SPC) para o SPD (CARVALHO et al., 2009). Essas modificações são principalmente verificadas após as áreas serem cultivadas com intenso revolvimento do solo sob SPC, que promoveu rápida mineralização do C biodegradável por mudanças nos mecanismos físicos de proteção dos agregados, recalitrância bioquímica e tempo de exposição (KOUTIKA et al., 1999). Com o mesmo sistema de sucessão de culturas sob Latossolo Vermelho Distrófico no Sul do Brasil, Sisti et al. (2004) não verificaram acúmulos significativos de COT na camada de 0-0,3 m após 13 anos sob SPD. A mesma tendência de aumento lento de COT em função do tempo de adoção do SPD também foi verificada por Guareschi, Pereira e Perin (2013b) em cronossequência de 3, 15 e 20 anos de SPD sob Latossolo Vermelho Distroférrico no cerrado goiano.

Para a camada de 0-0,05 m observou-se maior teor de COT na área de mata (40,78 g kg⁻¹), seguida pelas áreas de pastagem (31,56 g kg⁻¹) e SPD₂₂ (24,02 g kg⁻¹), diferentes entre si, e das demais áreas avaliadas. Nas duas últimas camadas, verificaram-se maiores teores de COT na área de pastagem diferindo de todas as outras áreas. Essa tendência também foi relatada por Loss et al. (2014) estudando área de pastagem e SPD com 15 anos de sucessão soja/azevém. Esse padrão destaca a contribuição do sistema radicular das gramíneas perenes em acumular C em profundidade (LOSS et al., 2014), uma vez que a área do estudo está ocupada com pastagem permanente há 39 anos, favorecendo principalmente a proteção de C no interior dos agregados (LOSS et al., 2011).

De modo geral, os teores de COT diminuíram em profundidade, padrão similar foi observado por Guareschi, Pereira e Perin (2012) com o mesmo tipo de solo e sistema de sucessão de culturas em áreas com 3, 15 e 20 anos de implantação do SPD no estado de Goiás, bem como por Bezerra et al. (2013) em sistemas de manejo sob Latossolo Vermelho Distrófico também em Goiás e Carneiro et al. (2009) sob o mesmo tipo de solo no estado do Paraná. A diminuição dos teores de C em profundidade demonstra contribuição das entradas de C na camada mais superficial em relação às camadas de 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, fato comum em sistemas sem revolvimento intensivo do solo (BEZERRA et al., 2013), como do SPD consolidado (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2013a).

As perdas percentuais de COT ocorreram na ordem de 54, 49, 41, 54 e 23% nas áreas de SPD₆, SPD₁₄, SPD₂₂, M+B e pastagem, respectivamente, em comparação com a mata para a camada de 0-0,05 m. Com exceção da área de pastagem, as maiores modificações nesta camada podem ser atribuídas ao tempo que estas áreas ficaram sujeitas ao revolvimento intensivo do solo sob SPC após o desmatamento em 1974. Já para as duas últimas camadas essa variação foi praticamente nula. Esse padrão evidencia a redução dos teores de COT em função do tempo de

desmatamento das áreas, principalmente em camadas superficiais, mais expostas às operações de revolvimento/desagregação do solo, conseqüentemente maior oxidação do COT (LEITE et al., 2003), sendo compensado posteriormente, mesmo que de forma lenta, pelo sistema conservacionista de manejo, no caso, o SPD com sucessão de culturas de soja, milho/trigo.

Tabela 2 - Teores de carbono orgânico total (COT) e das frações humificadas das MOS ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH) e humina (C-HUM), extrato alcalino (EA), relação ácido húmico e ácido fúlvico (AH/AF) e extrato alcalino/humina (EA/HUM) nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistema de manejo	COT	C-AF	C-AH	C-HUM	EA	AH/AF	EA/HUM
-----g kg ⁻¹ -----							
0-0,05 m							
SPD ₆	18,78d	2,83c	2,82c	11,14e	5,65b	1,01bc	0,51a
SPD ₁₄	20,94d	2,36d	2,12d	12,37d	4,48c	0,90cd	0,36c
SPD ₂₂	24,02c	4,24a	3,72b	15,15c	7,96a	0,88cd	0,53a
M+B	18,96d	3,21bc	2,59c	12,52d	5,80b	0,81d	0,46b
Pastagem	31,56b	3,26b	4,43a	21,98b	7,69a	1,36a	0,35c
Mata	40,78a	3,87a	4,15a	28,13a	8,02a	1,07b	0,29d
CV (%)	4,9	6,2	6,2	3,0	3,1	8,8	5,2
0,05-0,1 m							
SPD ₆	15,90d	2,60cd	2,55b	8,82d	5,15bc	0,98a	0,58b
SPD ₁₄	16,76cd	1,95e	1,68c	9,83c	3,63d	0,86b	0,37c
SPD ₂₂	18,24bc	4,02a	3,01a	10,55c	7,03a	0,75b	0,67a
M+B	17,32cd	2,97b	2,34b	10,00c	5,31b	0,79b	0,53b
Pastagem	19,60b	2,30d	2,40b	13,91b	4,70c	1,05a	0,34c
Mata	26,04a	2,84bc	2,21b	18,78a	5,05bc	0,78b	0,27d
CV (%)	4,9	6,3	8,1	3,1	5,2	7,0	7,1
0,1-0,2 m							
SPD ₆	12,44c	2,48b	1,71b	6,73c	4,19c	0,70b	0,62b
SPD ₁₄	12,72c	1,71c	1,17c	7,24c	2,88e	0,69b	0,40d
SPD ₂₂	14,76bc	3,60a	2,34a	8,58b	5,94a	0,65bc	0,69a
M+B	15,82b	2,84b	1,67b	8,63b	4,51bc	0,59c	0,52c
Pastagem	19,82a	2,57b	2,15a	13,11a	4,72b	0,84a	0,36d
Mata	14,94bc	2,48b	0,96c	9,48b	3,44d	0,39d	0,36d
CV (%)	9,7	7,8	7,9	5,3	5,9	7,3	5,8
0,2-0,4 m							
SPD ₆	9,82b	2,25b	1,02b	5,23c	3,27c	0,46bc	0,62b
SPD ₁₄	10,42b	1,51c	0,61c	6,04bc	2,12e	0,40c	0,35d
SPD ₂₂	9,90b	3,06a	1,36a	5,25c	4,42a	0,44bc	0,84a
M+B	10,64b	2,55b	1,31a	6,24b	3,86b	0,52ab	0,65b
Pastagem	11,84a	2,15b	1,19ab	8,01a	3,34c	0,55a	0,42cd
Mata	10,78b	2,14b	0,67c	6,31b	2,80d	0,32d	0,44c
CV (%)	4,9	10,1	9,3	6,7	6,1	9,5	7,2

Médias seguidas de letras iguais na coluna, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Os teores de C das frações húmicas e suas respectivas relações são apresentados na Tabela 2. De maneira similar ao observado para o COT, se verificam maiores teores destas frações na camada de 0-0,05 m, principalmente para o C-HUM, 28,13 g kg⁻¹ na área de mata. Os teores de C-HUM foram superiores em relação aos das frações AF e AH (Tabela 2; Figura 4), como também relatado em vários trabalhos recentes da literatura (BEZZERRA et al., 2013; CAETANO et al., 2013; CAMPOS et al., 2013; GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2013a), indicando maior interação dessa fração em solos tropicais altamente intemperizados (STEVENSON, 1994), em especial solos oxidicos (ASSIS et al., 2006), fato este confirmado pelos valores inferiores a unidade da relação EA/HUM (Tabela 2).

Como a fração HUM representa maior parte do COT do solo (Figura 4), é evidente que seu padrão seja semelhante ao observado para o COT, com maiores teores na área de mata nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m com valores de 28,13 e 18,78 g kg⁻¹, respectivamente. Para as camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m a área de pastagem apresentou os maiores teores com 13,11 e 8,01 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 2), mesmo padrão observado para os estoques C-HUM (Tabela 3). Este efeito pode estar relacionado com a acumulação de compostos orgânicos com elevada estabilidade química e peso molecular originados a partir da decomposição e humificação da MOS (STEVENSON, 1994). Os maiores teores de C das frações húmicas na área de mata, especialmente o C-HUM, devem-se ao maior aporte de serapilheira e ausência da ação antrópica, diferindo das áreas manejadas.

Em todas as áreas, a fração HUM representa, 64, 62, 59 e 58% do COT nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente, com diminuição percentual em profundidade (Figura 4). Representatividades de até 74% (MARCHIORI JUNIOR; MELO, 2000), 78% (SOUZA; MELO, 2003), 60% (LEITE et al., 2003), 69% (BARRETO et al., 2008) e 60% (ROSSI et al., 2011) da fração HUM também foram encontradas em diversos sistemas de manejo, regiões e tipos de solo. Esse padrão sugere um grau avançado de humificação da MOS especialmente nas áreas de mata e pastagem, sendo relacionado ao tamanho das moléculas, uma vez que a fração HUM é uma fração de grande estabilidade (FONTANA et al., 2006), resistente à biodegradação devido à complexação com íons metálicos e, ou argilo-húmicos estáveis (BARRETO et al., 2008; BENITES; MADARI; MACHADO, 2003); ou pelo fato das frações AH e AF serem menos estáveis, sendo submetidas à processos de polimerização e mineralização, com movimentação no perfil do solo (FONTANA et al., 2006), tendo sua composição diminuída (LEITE et al., 2003).

A movimentação relatada na seção do solo avaliada é evidenciada principalmente para os AF, pois sua representatividade em comparação às frações húmicas é maior em

profundidade, com valores médios de 13, 15, 17 e 22% (Figura 4). Esse padrão também é evidenciado pelo aumento dos estoques de C-AF (Tabela 3) em todas as áreas, fato também observado em áreas de cultivo sucessivo de soja/milheto por 1, 2, 6, 8 e 10 anos em Neossolo Quartzarênico no estado de Mato Grosso (CAETANO et al., 2013). Outro indicativo desta mobilidade é o aumento da relação EA/HUM em profundidade (Tabela 2). O aumento desta relação indica menor estabilidade química das frações da MOS em profundidade (FONTANA et al., 2006).

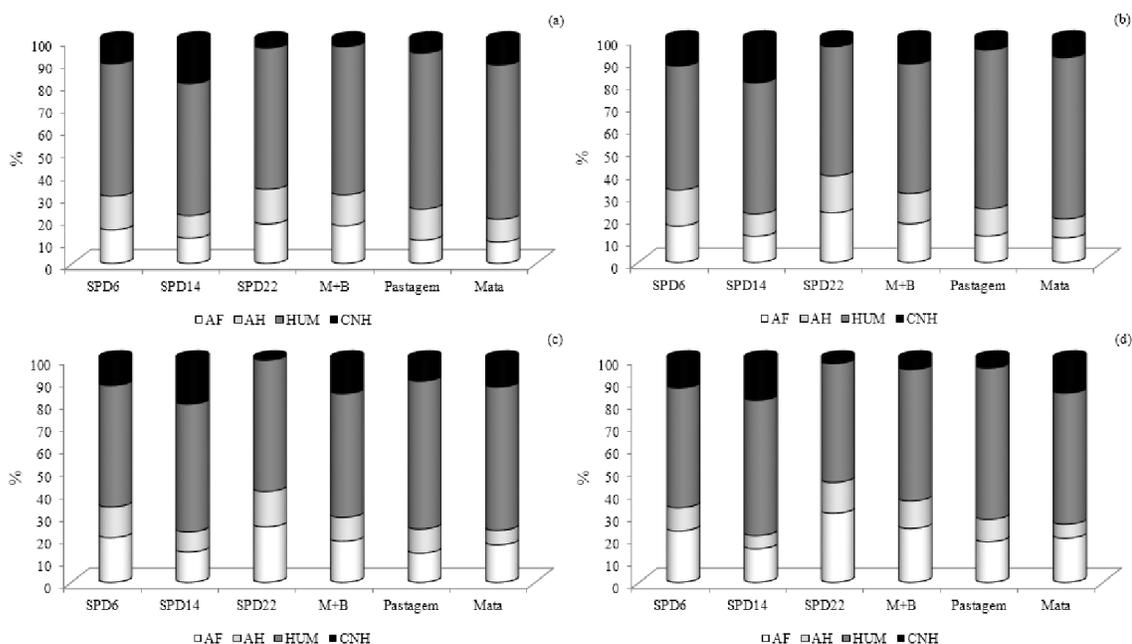


Figura 4 - Distribuição, em porcentagem, das frações húmicas do solo, ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HUM) e carbono não humificado (CNH) em diferentes sistemas de manejo sob Latossolo Vermelho Eutroférico na região Oeste do Paraná. (a) 0-0,05 (b) 0,05-0,1, (c) 0,1-0,2 e (d) 0,2-0,4 m.

Para a relação AH/AF, na qual, valores superiores à unidade indicam predomínio de AH em comparação aos AF, com material orgânico mais estável característico de solos férteis, observa-se apenas para a área de SPD₆, pastagem e mata na camada de 0-0,05 m e pastagem na camada de 0,05-0,1 m valores superiores a unidade, chegando a 1,36 na área de pastagem na camada de 0-0,05 m (Tabela 2). Esse padrão, de valores da relação AH/AF, é concordante com o observado por Bezerra et al. (2013) e Loss et al. (2013a) em áreas manejadas sob SPD, integração lavoura-pecuária (ILP) e cerrado, porém divergem dos verificados também em cronosequência de SPD e cerrado por Campos et al. (2013) no Piauí e Guareschi, Pereira e Perin (2013a) em Goiás. Sob sistema de sucessão de culturas mais diversificado

(soja/nabo/milho/aveia/braquiária), Fontana et al. (2006) observaram valores médios desta relação em torno de 1,03.

Houve diminuição nos valores da relação AH/AF em função do tempo de adoção do SPD, com diferenças significativas entre SPD₆ e as demais na camada de 0-0,05-0,1 m, com valores variando de 1,01 a 0,40, nas áreas de SPD₆ na camada de 0-0,05 m e SPD₁₄ na camada de 0,2-0,4 m, respectivamente. O mesmo padrão foi observado por Guareschi, Pereira e Perin (2013a) em cronossequência de SPD e Caetano et al. (2013) após 8 anos de sucessão soja/milheto, porém com valores desta relação superiores a unidade. A manutenção de maiores teores de C-AH em comparação aos teores de C-AF evidencia solos preservados, de manejo conservacionista. Em solos tropicais, normalmente esta razão é inferior a 1 devido à menor intensidade do processo de humificação, condensação e síntese, atribuídas à intensa mineralização dos resíduos, ao baixo conteúdo de bases trocáveis e atividade biológica nos solos mais intemperizados (CANELLAS et al., 2003).

Os maiores estoques de C-AF ocorreram na área de SPD₂₂ chegando a 6,49 Mg ha⁻¹ na camada de 0,2-0,4 m, sendo estes valores superiores aos observados nas demais áreas em todas as camadas com exceção da área de mata na camada de 0-0,05 m (Tabela 3). Esse padrão é confirmado pelo maior estoque desta fração na seção de 0-0,4 m em comparação as demais áreas. Em função do maior valor de estoque na seção de 0-0,4 m na área de SPD₂₂, é evidente que sua ΔEC em relação à área de referência é positiva e maior em relação as demais áreas, como pode-se observar na figura 5c.

Na área de mata, sem ação antrópica, e na área de pastagem com ausência de revolvimento do solo ao longo do tempo, os processos favoráveis a humificação da MOS podem atuar de maneira mais estável resultando em frações com maior estabilidade (FONTANA et al., 2006). Esse padrão pode ser confirmado pelo aumento na proporção do C-HUM até mesmo em profundidade, onde foram atingidos valores de 72% na camada de 0,05-0,1 m na área de mata. Nas duas primeiras camadas (0,0-0,05 e 0,05-0,1m), esse padrão também pode ser verificado, onde a área de mata apresentou os menores valores da relação EA/HUM (Tabela 2).

Para o estoque de C-HUM na camada de 0,2-0,4 m, todas as áreas foram semelhantes com exceção da área de pastagem, superando em 38% o estoque de C desta fração em comparação a área de mata (Tabela 3). Houve tendência aumento dos teores (Tabela 2) e estoques (Tabela 3) de C-HUM em relação ao tempo de implantação do SPD, porém com o mesmo padrão do COT, de forma lenta e gradual, especialmente em comparação entre as áreas de SPD₂₂ e SPD₆. Maiores teores e estoques de C-HUM podem implicar em melhoria de atributos importantes para a manutenção da capacidade produtiva das áreas, como exemplo,

maior retenção de água, melhoria na agregação do solo (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003) e maior retenção de cátions (ALVAREZ-PUEBLA; GOULET; GARRIDO, 2005; SOUZA; MELO, 2003), atributos que estão intimamente ligadas a duas das três formas de proteção de C no solo: proteção coloidal e proteção física no interior dos agregados (DUXBURY; SMITH; DORAN, 1989). Assis et al. (2006) verificaram maiores teores de C-HUM em macroagregados, sinalizando a importância dessa fração no processo de agregação.

Tabela 3 - Estoque de C da fração humina (C-HUM), ácido húmico (C-AH) e ácido fúlvico (AF) nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Profundidade (m)	Sistemas de uso do solo						CV(%)
	SPD ₆	SPD ₁₄	SPD ₂₂	M+B	Pastagem	Mata	
	Estoque de C-HUM (Mg ha ⁻¹)						
0-0,05	4,61c	5,12c	6,26c	5,19c	9,11b	11,64a	13,0
0,05-0,1	4,61b	5,39b	6,09b	5,42b	8,09a	9,07a	11,9
0,1-0,2	7,94c	8,70bc	10,00b	9,95b	14,67a	10,58b	9,5
0,2-0,4	11,29b	12,71b	12,06b	13,61b	17,91a	13,02b	9,3
0-0,4	28,45d	31,92cd	34,41c	34,17c	49,78a	44,31b	7,1
	Estoque de C-AH (Mg ha ⁻¹)						
0-0,05	1,17bc	0,88c	1,55ab	1,07c	1,84a	1,72a	15,9
0,05-0,1	1,29abc	0,91c	1,61a	1,20bc	1,51ab	1,06c	16,1
0,1-0,2	2,06bc	1,43d	2,75a	1,99c	2,43ab	1,07d	10,1
0,2-0,4	2,34c	1,38d	3,18a	2,82b	2,69b	1,37d	7,6
0-0,4	6,86b	4,60c	9,09a	7,08b	8,47a	5,22c	9,0
	Estoque de C-AF (Mg ha ⁻¹)						
0-0,05	1,17cd	0,98d	1,76a	1,33bcd	1,35bc	1,61ab	13,6
0,05-0,1	1,30bc	1,05c	2,00a	1,49b	1,28bc	1,38bc	15,8
0,1-0,2	2,80b	1,98c	4,11a	3,19b	2,81b	2,76b	12,6
0,2-0,4	4,71bc	3,15d	6,49a	5,36b	4,53bc	4,37c	9,4
0-0,4	9,98b	7,16c	14,36a	11,37b	9,97b	10,12b	8,6

Médias seguidas de letras iguais na linha, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Com relação os teores e estoques C-AH (Tabelas 2 e 3), é necessário destacar o aumento com o tempo de implantação do SPD para todas as camadas, principalmente quando se compara a área de SPD₂₂ com as demais. Os AH são considerados marcadores do processo de humificação e refletem, como tal, tanto a condição de gênese, como de manejo do solo (CANELLAS et al., 2003), estando relacionados a solos férteis com alto conteúdo de bases, responsáveis pela maior CTC de origem orgânica nas camadas superficiais (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003). Os maiores teores e estoques de C-AF e C-AH, especialmente na área de SPD₂₂ são um indicativo da presença de C em frações com menor estabilidade, que se destacam em diversos processos do solo, como agregação e ciclagem de nutrientes. Os AF

associados aos óxidos com baixo grau de cristalinidade podem apresentar importantes efeitos estruturais e fazer com que os agregados se tornem mais estáveis (KARLSSON; KAKANSSON; ALLARD, 1987). Para o estoque de C-AH, na seção de 0-0,4 m, a área de SPD₂₂ é semelhante à área de pastagem cultivada por 39 anos (Tabela 3), com variação positiva em comparação com a área de mata (Figura 5b).

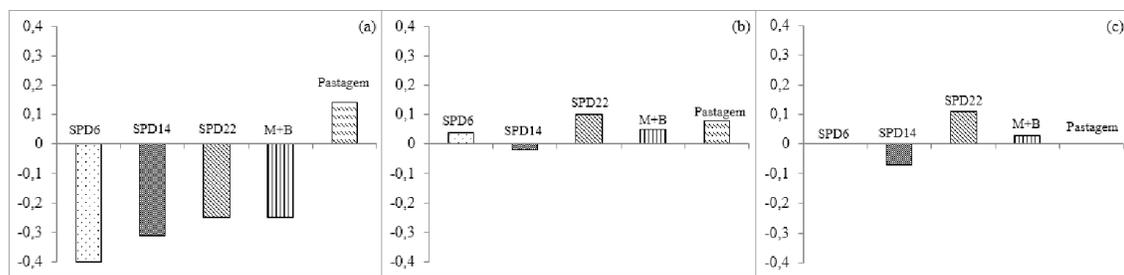


Figura 5 - Variação do estoque de C (ΔEC) das frações humificadas da matéria orgânica do solo das áreas manejadas na seção de 0-0,4 m em relação à área de mata nativa, na região Oeste do estado do Paraná, 2012: ΔEC -HUM (a), ΔEC -AH (b) e ΔEC -AF (c).

Quando se avalia apenas as áreas com SPD, verifica-se que os maiores valores de C das frações humificadas ocorrem na área de SPD₂₂, com porcentagem mínima para a fração de carbono não humificado (CNH) (Figura 4). Os valores observados para essa fração foram menores ao quantificados por Campos et al. (2013), porém com a área de SPD₁₄ apresentando maior distribuição percentual.

Na seção de 0-0,4 m, houve aumento do estoque de C-HUM em função do tempo de adoção do SPD (SPD₆ para SPD₂₂), porém este aumento não é significativo quando se compara aos estoques das áreas de mata e pastagem com valores de 44,31 e 49,78 Mg ha⁻¹, respectivamente. Na Figura 5a é possível observar variação negativa dos estoques de C-HUM em todas as áreas estudadas com exceção para a área de pastagem. Destaca-se também, a diminuição, mesmo não tão significativa da variação negativa do estoque de C-HUM em função tempo de implantação do SPD, com variação mais negativa em SPD₆ e menos negativa nas áreas de SPD₂₂ e M+B, o que pode indicar menor perda de C desta fração em função do tempo de implantação, ou seja, para as condições avaliadas, o SPD em sucessão contribuiu para o aumento dos EC desta fração, mesmo que de forma lenta.

4.5.2 Frações Oxidáveis da Matéria Orgânica do Solo

Os teores de C das frações oxidáveis e suas respectivas relações se encontram na Tabela 4. Para a camada de 0-0,05 m, a área de mata apresentou maiores teores de C nas frações F1 (carbono lábil - C_L) e F3, com valores de 12,87 e 8,52 g kg⁻¹, respectivamente, diferindo das demais áreas. Para a fração F2, foi verificada certa semelhança entre as áreas, em especial a área com SPD₆, SPD₂₂, pastagem e mata, com teores variando de 4,06 a 4,57 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 m. A área de pastagem, para esta camada, apresentou maior teor de C na F4, ou seja, a fração mais recalcitrante dentre as analisadas.

Tabela 4 - Frações oxidáveis de carbono orgânico (F1, F2, F3 e F4), carbono não-lábil (C_{NL}), proporção de carbono lábil/C total (C_L/C) e relações entre as frações oxidáveis (F1/F4 e F1+F2/F3+F4) nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistema de manejo	F1	F2	F3	F4	C_{NL}	C_L/C	F1/F4	F1+F2/ F3+F4
	-----g kg ⁻¹ -----					%		
0-0,05 m								
SPD ₆	5,52e	4,06a	4,78d	3,30d	13,26d	29,44bc	1,70b	1,19a
SPD ₁₄	6,67d	2,40c	5,54c	5,74b	14,27cd	31,87b	1,16c	0,80c
SPD ₂₂	7,79c	4,34a	6,20b	4,05c	16,23c	32,55ab	1,94ab	1,18a
M+B	6,93d	3,22b	5,83bc	3,39cd	12,03d	36,68a	2,05ab	1,10ab
Pastagem	8,81b	4,24a	5,82bc	7,65a	23,05b	26,97c	1,11c	0,95bc
Mata	12,87a	4,57a	8,52a	5,74b	27,91a	31,66b	2,26a	1,22a
CV (%)	4,3	8,3	5,0	7,3	7,6	7,4	11,2	7,6
0,05-0,1 m								
SPD ₆	3,96e	3,10b	4,97c	3,51b	11,94bc	24,93b	1,13c	0,83b
SPD ₁₄	5,10cd	2,11c	4,95c	4,79a	11,66c	30,41a	1,08c	0,74b
SPD ₂₂	5,46bc	3,26b	5,00bc	2,78c	12,79bc	30,03a	1,97a	1,13a
M+B	4,79d	2,22c	5,69b	3,63b	12,53bc	27,73ab	1,33c	0,75b
Pastagem	5,89b	3,12b	4,13d	4,49a	13,71b	30,12a	1,32c	1,05a
Mata	8,15a	4,12a	6,42a	4,92a	17,89a	31,36a	1,66b	1,08a
CV (%)	5,5	8,1	6,9	7,8	7,2	7,2	10,1	7,2
0,1-0,2 m								
SPD ₆	2,71d	1,92c	3,92cd	3,54b	9,73bc	21,78c	0,77d	0,62cd
SPD ₁₄	3,88c	0,98e	5,59b	2,97bc	8,84c	30,59ab	1,31c	0,57d
SPD ₂₂	5,08a	1,54d	4,31c	2,32cd	9,68bc	34,89a	2,23a	1,00a
M+B	3,39c	2,25b	3,71d	4,35a	12,43ab	21,93c	0,78d	0,70c
Pastagem	5,50a	3,00a	6,73a	3,18b	14,32a	27,75bc	1,77b	0,86b
Mata	4,43b	1,99b	4,31c	2,23d	10,51bc	29,84ab	2,00ab	0,98a
CV (%)	5,9	8,2	6,0	11,3	14,1	11,8	15,6	5,5

Médias seguidas de letras iguais na coluna, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Especialmente para a F1, para a área de mata, o aporte de serapilheira de forma contínua, contribui para aumento dos seus teores (LOSS et al. 2014). Esse padrão é concordante também com os maiores teores de COT observados nessa área (Tabela 2). Comportamento similar foi verificado por Guareschi, Pereira e Perin (2013b) comparando área de Cerrado e cronosequência de 3, 5 e 20 anos de SPD sob Latossolo Vermelho Distroférico.

Com relação a fração F1, avaliando a cronosequência de SPD, observa-se aumento nos teores desta fração em função do tempo de implantação para todas as camadas, da mesma forma como relatado por Guareschi, Pereira e Perin (2013b) em cronosequência de SPD no cerrado goiano. Esse padrão é característica de sistemas conservacionistas de manejo (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001), com aporte de resíduos de plantas na superfície (BARRETO et al., 2011) sem revolvimento do solo (RANGEL et al., 2008), beneficiando a ciclagem de nutrientes (LOSS et al., 2009).

É possível afirmar que o sistema de manejo baseado na sucessão soja, milho/trigo contribui para o incremento dos teores de C das frações de maior labilidade, porém de maneira menos expressiva quando se considera também a fração F2, quanto se houvesse um sistema de rotação de culturas com maior complexidade como relatado na literatura com relação a quantidade (SISTI et al., 2004) e qualidade (LOSS et al., 2013a) do C adicionado ao solo, como também relatado para as frações húmicas da MOS (Tabela 2). Loss et al. (2013a) observaram maior contribuição da fração F1 em área de SPD no cerrado com maior número de culturas no sistema de manejo (girassol/milheto/soja e milho). A importância dos maiores teores de C das frações de maior labilidade do C, está na melhoria dos atributos químicos e físicos do solo, como ciclagem de nutrientes e agregação do solo (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995).

Com exceção da camada de 0-0,05 m, não foi observado aumento dos teores da fração F4 em função da adoção do SPD, padrão divergente do verificado por Guareschi, Pereira e Perin (2013b) em área de cronosequência SPD sob Latossolo Vermelho Distroférico, que observaram aumentos em todas as camadas avaliadas. Na camada de 0-0,05 m a área de pastagem apresentou teor superior desta fração, 7,65 g kg⁻¹. Para a camada de 0,05-0,1 m, nas áreas de mata, pastagem e SPD₁₄ foram quantificados os maiores teores da fração F4. Já na camada de 0,1-0,2 m a área de pastagem, com 6,73 g kg⁻¹ para a fração F3 e M+B com 4,35 g kg⁻¹ para a fração F4, apresentaram valores superiores (Tabela 4). De modo geral, destaca-se a área de pastagem com maiores teores de C nas frações F3 e F4. Este padrão pode ser devido ao acúmulo de compostos orgânicos de maior estabilidade química e alto peso molecular oriundos da decomposição e favoráveis condições para a humificação da MOS (STEVENSON, 1994), sendo as frações mais resistentes no solo, com maior tempo de permanência (CHAN;

BOWMAN; OATES, 2001). Maiores teores de C destas frações são concordantes com maiores teores de C-HUM (Tabela 2), fração química mais estável da MOS.

Para a fração F1, observa-se nas duas primeiras camadas maior variação estatística entre as áreas, mesmo na cronosequência de SPD. A fração F1 pode ser considerada um bom indicador de sensibilidade da fração orgânica (BARRETO et al., 2011), por ser a fração, mais sensível as mudanças promovidas pelos sistemas de manejo (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2013b), com diferenças visíveis em período mais curto (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001). Como a fração F1 se mostra sensível em detectar mudanças nos sistemas de manejo, conseqüentemente o carbono não lábil (C_{NL}) segue o mesmo padrão, visto que é calculado a partir da subtração do COT pelo C da F1 (C_L). Para o C_{NL} , foram observadas maiores diferenças entre as áreas na camada de 0-0,05 m, com maiores teores nas áreas de pastagem (23,05 g kg⁻¹) e mata (27,91 g kg⁻¹) (Tabela 4), padrão concordante com os maiores teores de COT e C-HUM apresentados nesta camada (Tabela 2). Guareschi, Pereira e Perin (2013b) relatam que o C_{NL} em camadas mais profundas, apresenta maior resistência a modificações em função da maior proteção oferecida pela profundidade, sendo que, maiores alterações só serão verificadas quando houver sensíveis modificações nos teores de COT.

Foi observado o aumento do teor de C_{NL} em função do tempo de implantação do SPD apenas na camada de 0-0,05 m, de 13,26, 14,27 e 16,23 g kg⁻¹ nas áreas de SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente, com diferenças entre as áreas de 6 e 22 anos (Tabela 4). Pode-se considerar que o aumento do C_{NL} torna-se de grande importância para a estabilidade do SPD, pois o C_{NL} apresenta ciclagem mais lenta em relação ao C_L , além de atuar como reservatório de nutrientes e também na estabilização de microagregados do solo (ZECH et al., 1997).

O equilíbrio na distribuição do C é avaliado segundo as relações F1/F4 e F1+F2/F3+F4, onde valores destas relações mais próximos a um indicam maior equilíbrio na distribuição dos teores de C lábeis e recalcitrantes. A relação F1/F4, na camada de 0-0,05, teve maior valor na área de mata (2,26), sendo semelhante as áreas de SPD₂₂ e M+B. Para as demais camadas, na área de SPD₂₂ apresentou maiores valores, porém não diferindo da área de mata na última camada. De maneira geral, nas áreas de SPD, à predominância da fração F1 em comparação a F4, ou seja, predominância de formas mais lábeis de C (Tabela 4). Sob 15 anos de sucessão soja/azevém sob SPD, Loss et al. (2014) observaram valores desta relação variando de 0,86 a 1,25.

Quando se avalia as quatro frações (F1+F2/F3+F4), destaca-se a área de pastagem, com valores próximos a unidade, especialmente nas duas primeiras camadas. Da mesma forma que a relação F1/F4, na área de SPD₂₂, verificam-se maiores valores desta, variando de 1,00 a

1,18 nas camadas de 0,1-0,2 e 0-0,05 m, respectivamente, sendo na primeira camada semelhante à área de M+B, SPD₆ e mata (Tabela 4). Isso indica maiores entradas de material vegetal de maior labilidade, como também observado por Loss et al. (2013a) em áreas de SPD e ILP no cerrado goiano. Outro indicativo da entrada de C com maior labilidade nas áreas de SPD₂₂ e M+B é através da avaliação da relação percentual de C_L/C , onde estas áreas se destacam na camada de 0-0,05 m, sendo a área de M+B diferindo da área de mata. Os valores desta relação foram superiores ao encontrados por Rangel et al. (2008) e Guareschi, Pereira e Perin (2013b) sob Latossolos nos estados de Minas Gerais e Goiás, respectivamente.

De maneira geral, a participação das frações F1 e F2 decresce com a profundidade, passando de 52 para 48 e 44% e as frações F3 e F4 aumentam, passando de 48, para 52 e 56% nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, indicando certo equilíbrio na distribuição do C destas frações (Tabela 4). Em áreas de cerrado goiano, Guareschi et al. (2013b) observaram que a participação das frações mais recalcitrantes chegou a 66%, já Loss et al. (2013b) quantificaram participação de 65% em áreas de pastagem. O maior equilíbrio da distribuição das frações oxidáveis pode ser constatado também quando se compara os valores quantificados com o trabalho de Loss et al. (2013a) também no cerrado Goiano. Os autores quantificaram valores da relação F1/F4 chegando a 8,4 e, F1+F2/F3+F4 superiores a 2,0 em áreas com SPD e ILP. É interessante obter balanço de C entre as frações oxidáveis, com as mesmas proporções de C entre as frações (ZHONGKUI; WANG; SUN, 2010), com representatividade de frações que auxiliam na ciclagem de nutrientes e outras que auxiliam efetivamente nos processos de agregação a longo prazo (LOSS et al., 2009).

Na análise canônica para as frações químicas da MOS, a primeira e a segunda variável canônica corresponderam a 93,86 e 4,06% da variação total, respectivamente, representando 97,92% da variação total (Figura 7a). Na mesma análise para frações oxidáveis, corresponderam a 82,95 e 12,70% da variação total, representando 95,65% (Figura 7b), atendendo os requisitos mínimos para a avaliação por meio da dispersão gráfica (CRUZ; REGAZZI, 1994), desta forma, o método de agrupamento de Tocher modificado foi utilizado.

Para as frações químicas da MOS (Figura 7a), evidenciou-se a formação de três grupos distintos, um formado pelas áreas de SPD₆, SPD₁₄ e M+B, outro grupo formado pela área de SPD₂₂, e um terceiro grupo formado pelas áreas de pastagem e mata nativa. Para a separação destes grupos, as variáveis que mais contribuíram para a discriminação dos sistemas de manejo foram o CNH, os teores de AF e HUM, ou seja, em parte as frações mais lábeis do carbono (CNH e AF) e também a fração mais recalcitrante do ponto de vista químico (HUM). Para a formação dos grupos em função das frações oxidáveis da MOS (Figura 7b), foram formados

apenas dois grupos, um representado pela área de mata nativa, e outro representado pelos sistemas manejados em SPD e pastagem, sendo que os teores de COT e C das frações F1 e F3 foram os atributos que mais contribuíram para discriminar os sistemas de manejo avaliados.

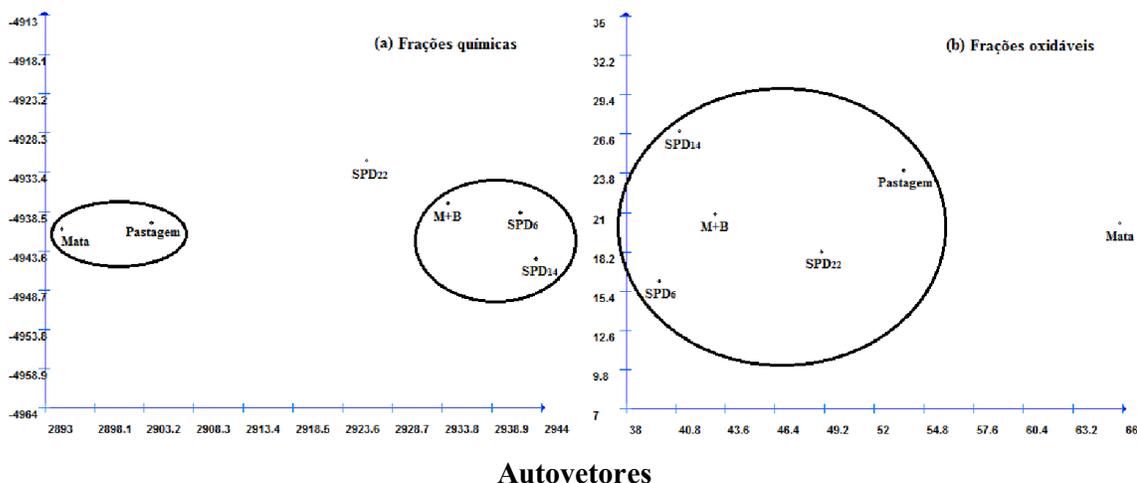


Figura 6 - Dispersão dos diferentes sistemas de uso e manejo e agrupamento pelo método de Tocher modificado das duas primeiras variáveis canônicas em função das frações químicas (a) e oxidáveis (b) da matéria orgânica do solo em Latossolo Vermelho Eutroférico típico, nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná.

Desta forma, quando se avalia o agrupamento dos diferentes sistemas de manejo em função das frações químicas (a) e oxidáveis (b), observa-se que as frações químicas da MOS foram as frações que discriminaram de forma mais acentuada os sistemas de manejo avaliados em função do tempo de implantação e sistema de manejo. Trabalhos como os de Cunha et al. (2005); Loss et al. (2006) e Rossi et al. (2011) relatam a grande sensibilidade das frações húmicas em detectar mudanças nos sistemas de manejo ao longo do tempo de condução. Dentre as áreas sob SPD, a área com 22 anos foi a que apresentou maiores teores (Tabela 2) e estoques (Tabela 3) de carbono das frações químicas da MOS, diferindo na maioria destes atributos. A área de pastagem foi a que mais se aproximou das condições originais do solo (mata nativa), quando se avalia apenas as frações químicas da MOS. Pelo agrupamento formado pelas frações oxidáveis da MOS, houve igualdade de condições entre as áreas manejadas. Isso evidencia, quando se compara as frações químicas e oxidáveis da MOS, que as frações químicas, para a condição estudada, contribuíram de forma mais significativa para a discriminação das áreas em função do sistema de manejo e tempo de implantação do SPD.

4.6 CONCLUSÕES

O teor de carbono orgânico total das camadas superficiais aumentou de forma gradual e lenta no sistema plantio direto com sucessão soja, milho/trigo.

Houve predomínio da fração humina em comparação aos ácidos húmicos e fúlvicos, com maiores teores e estoques nas áreas de mata e pastagem e com movimentação das frações do extrato alcalino em profundidade.

A área com 22 anos de sistema plantio direto apresentou maiores teores e estoques de ácidos húmicos e fúlvicos e variação de estoque de C-HUM menos negativa em relação às áreas com 6 e 14 anos de adoção do sistema plantio direto no sistema de sucessão soja, milho/trigo.

Existe equilíbrio na distribuição do carbono das frações oxidáveis, com predomínio das frações lábeis nas camadas mais superficiais e recalcitrantes em camadas mais profundas.

No agrupamento dos atributos avaliados, as frações químicas da matéria orgânica do solo discriminaram de forma mais sensível os sistemas de manejo avaliados.

4.7 REFERÊNCIAS

ALVAREZ-PUEBLA, L. A.; GOULET, P. J. C.; GARRIDO, J. J. Characterization of the porous structure of different humic fraction. **Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 256, n. 2-3, p. 129-135, 2005.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, SBCS, 2007. Cap. 6, p.873-928.

ASSIS, C. P.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1541-1550, 2006.

BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1471-1478, 2008.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; FONTES, A. G.; POLIDORO, J. C.; MOCO, M. K. S.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 81, n. 3, p. 213-220, 2011.

BENITES, V. M.; MÁDARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado e de baixo custo**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2003. 7p. (Comunicado Técnico, 16).

BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Formas de carbono em Latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado, Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2637-2654, 2013.

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

CAETANO, J. O.; BENITES, V. M.; SILVA, G. P.; SILVA, I. R.; ASSIS, R. L.; CARGNELUTTI FILHO A. Dinâmica da matéria orgânica de um Neossolo Quartzarênico de cerrado convertido para cultivo em sucessão de soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1245-1255, 2013.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. 2ªEd. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 3, p. 19-26.

CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; BRASIL, E. L.; IWATA, B. F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 304-312, 2013.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PÍCCOLO, M. C.; GODINHO, V. P. CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009.

CARNEIRO, C. E. A.; MELÉM JÚNIOR, N. J.; AZEVEDO, M. C. B.; ANDRADE, E. A.; KOGUISHI, M. S.; DIEHL, R. C.; RICCE, W. S.; PASSARIN, A. L.; VAZ, R. H. M.; STELMACHUK, T. L. L.; GUIMARÃES M. F.; RALISCH, R. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total e carbono residual de um Latossolo Vermelho Eutroférico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, n. 1, p. 5-10, 2009.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD-ROM.

CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, Philadelphia, v. 166, n. 1, p. 61-67, 2001.

CRUZ, C. D. **Programa genes: biometria**. Ed. Viçosa, UFV, 2006. 382 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 1994. 394 p.

CUNHA, T. J. F.; RIBEIRO, L. P.; SILVA, E. F.; CONCEIÇÃO, M. Caracterização e natureza do húmus de Latossolos Amarelos coesos de tabuleiros na região do recôncavo baiano. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 15, n. 2, p. 147-154, 2003.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. W. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, S. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. Ed. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: Nifital Project, 1989. cap. 2, p.33-67.

EMBRAPA. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2007. 73 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, Nova York, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J.C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 847-853, 2006.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; MCKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n.3, p. 975-985, 2006.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 909-920, 2012.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2615-2628, 2013a.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 242-250, 2013b.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (2 Ed). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 3, p.19-26.

KARLSSON, S.; KAKANSSON, K.; ALLARD, B. Simultaneous dissolution of organic acids in sequential leaching of sediment bound trace metals. **Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering**, London, v. 22, n. 6, p. 549-562, 1987.

KOUTIKA, L. S.; CHONÉ, T. H.; ANDREUX, F.; BURTIN, G.; CERRI, C.C. Factors influencing carbon decomposition of topsoils from the Brazilian Amazon Basin. **Biology and Fertility of Soils**, Amsterdam, v. 28, n. 4, p. 436-438, 1999.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; MACHADO, P. L. O. A.; GALVÃO, J. C. C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 821-832, 2003.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BRITO, G. P. Distribuição das substâncias húmicas em solos de Tabuleiro sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, v. 26, n.2, p. 68-77, 2006.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; FERREIRA, E. P.; SANTOS, L. L.; BEUTLER, S. J.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. L. Frações oxidáveis do carbono orgânico do solo em sistema de aléias sob Argissolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 867-874, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; BEUTLER, S. J.; FERREIRA, E. P.; SILVA, E. M. R. Oxidizable organic carbon fractions and soil aggregation in areas under different organic production systems in Rio de Janeiro, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, Yucatán, v. 14, n. 2, p. 699-708, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; BEUTLER, S. J.; ANJOS, L. H. C. Oxidizable carbon and humic substances in rotation systems with brachiaria/livestock and pearl millet/no livestock in the Brazilian Cerrado. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 11, n. 1, p. 217-231, 2013a.

LOSS, A.; COUTINHO, F. S.; PEREIRA, M. G.; SILVA, R. A. C.; TORRES, J. L. R.; RAVELLI NETO, A. Fertilidade e carbono total e oxidável de Latossolo de Cerrado sob pastagem irrigada e de sequeiro. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 43, n. 3, p. 426-432, 2013b.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 43-54, 2014.

MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1177-1182, 2000.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 79-84, 2004.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; GUILHERME, L. R. G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 429-437, 2008.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 622-630, 2011.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Matéria orgânica de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1113-1122, 2003.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York: John Wiley e Sons, 1994. 496p.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (eds) **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society American, 1996. cap. 35, p.1011-1020.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, n. 1-4, p. 117-161, 1997.

ZHONGKUI, L.; WANG, E.; SUN, O. J. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agroecosystems: a review and synthesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 3-4, p. 211-223, 2010.

5 CAPÍTULO 3: FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA E AGREGAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO COM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO

5.1 RESUMO

As frações da matéria orgânica do solo (MOS) aliadas ao estudo dos agregados, são técnicas essenciais na avaliação da qualidade dos sistemas produtivos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar as frações físicas granulométricas da MOS e a agregação do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições, sendo estudadas áreas com diferentes tempos de adoção do sistema plantio direto (SPD): 6 anos (fase de transição), 14 anos (fase de consolidação) e 22 anos (fase de manutenção) no sistema de sucessão de culturas de soja (verão) e milho/trigo (inverno) (SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente); 12 anos de SPD no mesmo sistema de sucessão e mais 4 anos com introdução de braquiária em consórcio com o milho nos cultivos de inverno (fase de consolidação) - (M+B); área de pastagem permanente e mata nativa. Foi realizado o fracionamento físico da MOS determinando os teores de carbono orgânico total (COT), matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica associada aos minerais (MOM). Posteriormente calculou-se os índices de manejo de carbono (IMC), sendo avaliadas também as variáveis relacionadas a estabilidade estrutural do solo e carbono mineralizável em agregados. As áreas de mata e pastagem apresentaram os maiores teores de COT, MOP e MOM, especialmente nas camadas superficiais, chegando a 40,78 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 m na área de mata para o COT, além de maiores estoques de MOP e MOM. Dentre as áreas manejadas em SPD, a área de 22 anos obteve maiores teores de COT e teores e estoques de MOP e MOM, além de melhores IMC. Houve evolução dos índices de agregação em função do tempo de implantação do SPD, porém inferiores as áreas de pastagem e mata. As áreas de SPD₂₂, pastagem e mata apresentaram maior evolução de C-CO₂ indicando maior atividade biológica nestas áreas, com reflexos positivos nos processos de humificação da MOS e estabilidade estrutural do solo.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Estabilidade de agregados. Labilidade.

5.2 ABSTRACT

The fractions of soil organic matter (SOM) allied to the study of aggregates are essential techniques to evaluate soil quality of agricultural production systems. The objective of this study was to evaluate the physical granulometric fractions of soil organic matter and soil aggregation in different management systems under clayey Red Latosol in the western region of Paraná, Brazil. Five managed areas and a reference area (native forest) without anthropic action were analyzed in a completely randomized design with five replications. Management systems include three areas with different time of first adoption of the no-till: 6 years - NT₆ (transition phase), 14 years - NT₁₄ (consolidation phase) and 22 years - NT₂₂ (maintenance phase) under continuous soybean–maize or wheat cropping system; 12 years of no-till under soybean–maize/wheat cropping system, and in the last four years with integration of maize and ruzigrass (*Brachiaria ruziziensis*) (consolidation phase) - (NT+B) and an area of permanent and continuous extensive cattle pasture of coast-cross (*Cynodon dactylon*). Physical fractionation of SOM was measured by the total organic carbon (TOC), particulate organic matter (POM), organic matter associated with minerals (MOM). Subsequently, carbon management index (BMI), variables related to soil structural stability and mineralized carbon in aggregates were calculated. The areas of native forest and pasture presented the highest TOC, POM and MOM levels, especially in the surface layers, reaching 40.78 g kg⁻¹ in the 0-0.05 m layer in the forest area for TOC. These areas also had the highest POM and MOM stocks. Among the managed areas in NT, the area with 22 years of no-till practices presented the highest TOC levels and POM and MOM stocks, and the best BMI. There was improvement of soil aggregation indexes due to the time of adoption of the no-till, however, lower than the native forest and pasture areas. The NT₂₂, pasture and forest areas had the highest evolution of C-CO₂ indicating higher biological activity in these areas, with positive effects on humification processes of SOM and soil structural stability.

Key words: No-till. Aggregate stability. Lability.

5.3 INTRODUÇÃO

O manejo inadequado dos sistemas agrícolas resulta em efeitos prejudiciais na qualidade dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (BAYER et al., 2004). A reversão desse quadro pode ser possível por meio de práticas de manejo como o sistema plantio direto

(SPD) e sistemas de consórcio entre culturas. Sá et al. (2004) ressaltaram a importância do tempo de adoção do SPD para que as alterações no acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) e agregação se processem.

Sistemas de manejo que favorecem o acúmulo de carbono (C) (AZIZ; MAHMOOD; ISLAM, 2013) contribuem para a redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera (BANDYOPADHYAY; LAL, 2014). A modificação da qualidade do solo através da utilização de sistemas de manejo que aportam diferentes quantidades de biomassa vegetal, pode ser identificada pela fração particulada da MOS (MOP) (MARRIOTT; WANDER, 2006). A MOP é considerada uma das frações mais sensíveis as alterações no solo (BATISTA et al., 2013), por ser a fração lábil do C (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), podendo ser utilizada como ferramenta para avaliar a qualidade do solo, principalmente em um curto período de tempo, quando ainda não houveram alterações no carbono orgânico total (COT) (CONCEIÇÃO et al., 2005). Este conhecimento dos diferentes reservatórios de C permite monitorar a qualidade dos sistemas agrícolas (BENBI et al., 2015).

Sistemas de manejo que preconizam o revolvimento intenso do solo por implementos agrícolas, afetam o teor de MOS, considerado principal agente de formação e estabilização dos agregados (BAYER et al., 2004). O fracionamento físico de agregados juntamente com o conhecimento detalhado da dinâmica da MOS, pode facilitar a compreensão da dinâmica do C do solo (BANDYOPADHYAY; LAL, 2014). Os agregados protegem o C no seu interior (proteção física), oferecendo proteção contra os processos microbianos e reações enzimáticas (LAL; FOLLET; KIMBLE, 2003), sendo adequado conhecer os fatores que afetam a formação e estabilização dos mesmos (TISDALL; OADES, 1982), e também como são afetados pelos diferentes sistemas de manejo (BRONICK; LAL, 2005; WEST; POST, 2002). Desta forma, é possível identificar as práticas agrícolas favoráveis para a manutenção da capacidade produtiva dos solos (MAJUMDER; KUZYAKOV, 2010).

A avaliação da qualidade do solo é efetuada por um conjunto de indicadores físicos, químicos e biológicos (AZIZ; MAHMOOD; ISLAM, 2013), sendo primordial o conhecimento dos indicadores estruturais, pois proporcionam condições para intensificar a atividade biológica e elevar a qualidade química do solo (MUELLER et al., 2013). Diversas funções do solo, como a atividade e diversidade biológica, dinâmica e ciclagem de nutrientes e crescimento das plantas são afetados pela qualidade estrutural do solo (BRONICK; LAL, 2005). Vários trabalhos relatam a importância do manejo adequado do solo com mínimo revolvimento, tanto para potencializar o aumento nos teores de COT (ANDRADE et al., 2010; WEST; POST, 2002), MOP (BATISTA et al., 2013; BENBI et al., 2015), quanto aumentar estabilidade

(BHATTACHARYYA et al., 2009; SIX; PAUSTIAN, 2014) e tamanho de agregados (ASSIS; LANÇAS, 2010; WENDLING et al., 2005).

Sistemas de manejo que preconizam menor revolvimento do solo e aumento do conteúdo de COT, como o SPD (BARRETO et al., 2009), consórcios entre cultivos agrícolas e pastagens (LOSS et al., 2013) e/ou incorporação de pastagens em certos períodos de tempo (SALTON et al., 2008), são fundamentais para aumentar a capacidade de suporte das áreas agrícolas (ARATANI et al., 2009), com observação da melhoria dos atributos do solo em função do tempo de adoção (ANDRADE et al., 2010). Desta forma, a partir do pressuposto que os sistemas conservacionistas, a exemplo do SPD ao longo tempo, beneficiam a qualidade do solo, objetivou-se avaliar as frações físicas da matéria orgânica e agregação do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação sob Latossolo Vermelho Eutroférico na região Oeste do estado do Paraná.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Localização, Clima e Solo da Área de Estudo

A localização da área de estudo está apresentada no item 3.4.1 do Capítulo 1 (pág. 20).

5.4.2 Sistemas Avaliados e Histórico de Uso

A descrição dos sistemas avaliados está apresentada no item 3.4.2 do Capítulo 1 (pág. 21).

5.4.3 Coleta das Amostras de Terra

Em cada área de estudo foram demarcadas glebas de 400 m², nas quais foram realizadas as coletas das amostras de terra, cada gleba representou uma repetição. Para o fracionamento físico e posteriores cálculos de índice de manejo de carbono (IMC), as amostras foram coletadas em cinco pontos (glebas-repetições) dentro dos seis sistemas de manejo, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1-0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, sendo cada amostra composta representada por dez amostras simples, sendo posteriormente secas, destorroadas e passadas em peneira 2 mm, constituindo a terra fina seca ao ar (TFSA). Também foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de anel volumétrico com volume de 46,2 cm³ com cinco repetições

em todas as áreas e camadas. Para as análises de agregação, foram coletadas amostras indeformadas com preservação da estrutura do solo (monólitos de dimensões 0,2 x 0,2 x 0,05 m) nas mesmas áreas e glebas, em cinco repetições nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m.

5.4.4 Análises Realizadas

Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Gênese e Classificação de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

a) Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono (IMC)

Para o fracionamento granulométrico da MOS, 20 g de TFSA e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) foram agitados durante 15 horas em agitador horizontal (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). A seguir, a suspensão foi passada em peneira de $53 \mu\text{m}$ com auxílio de jato de água. O material retido na peneira, que consiste no carbono da matéria orgânica particulada (MOP) associado à fração areia, foi seco em estufa a 60°C , quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado juntamente com o carbono orgânico total (COT) através de combustão seca por analisador CHNS (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Alemanha). O material que passou pela peneira de $53 \mu\text{m}$, que consiste no carbono da matéria orgânica associada aos minerais (MOM) das frações silte e argila, foi obtido por diferença entre o COT e MOP. Posteriormente foram calculados índices para avaliação da qualidade da fração orgânica do solo como o índice de estoque de carbono (IEC) (1), labilidade da MOS (Lab) (2), índice de labilidade (ILab) (3) e índice de manejo de carbono (IMC) (4). O cálculo do IMC e de seus respectivos componentes foram realizados conforme as equações que seguem, como proposto por Blair et al. (1995):

$$\text{IEC} = \frac{\text{COT trat}}{\text{COT ref}} \quad (1)$$

$$\text{Lab} = \frac{\text{C-MOP}}{\text{C-MOM}} \quad (2)$$

$$\text{ILab} = \frac{\text{Lab trat}}{\text{Lab ref}} \quad (3)$$

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{ILab} \times 100 \quad (4)$$

onde:

IEC = índice de estoque de C;

COT trat = estoque de COT (Mg ha^{-1}) no sistema de manejo em análise;

COT ref = estoque de COT (Mg ha^{-1}) no sistema referência;

Lab = labilidade da MOS;

C-MOP = carbono da fração particulada da MOS;

C-MOM = carbono da fração associada aos minerais da MOS;

ILab = índice de labilidade do sistema de manejo em análise;

Lab trat = labilidade da MOS no sistema de manejo em análise;

Lab ref = labilidade da MOS no sistema de referência;

IMC = índice de manejo de carbono.

A partir da determinação dos teores de C da MOP e MOM, foram calculados os estoques de C da MOP e MOM segundo o método da massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995; SISTI et al., 2004).

b) Agregação e carbono mineralizável em agregados

Para as análises de estabilidade de agregados, inicialmente com as amostras secas ao ar, realizou-se o peneiramento a seco para a separação dos agregados de diâmetro entre 8,00 mm e 4,00 mm em agitador mecânico SOLOTEST[®], pelo tempo de dois minutos, na escala 10 do aparelho. Da fração retida na peneira de 4,00 mm, separaram-se 25 g de agregados, quantidade que foi umedecida com água por capilaridade, sobre papel filtro durante 10 minutos. Posteriormente as amostras foram submetidas ao peneiramento em água pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), em agitador mecânico tipo Yoder (YODER, 1936) em jogo de peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm.

A fração de agregados retida em cada peneira foi transferida para recipientes de alumínio e levada à estufa em temperatura de 55 °C. Após 48 horas, em média, as amostras foram pesadas e os resultados corrigidos em função da umidade inicial da amostra, sendo calculada a porcentagem de agregados retidos em cada classe de peneiras. Com a massa das frações de agregados retidas nas peneiras, calcularam-se o diâmetro médio ponderado (DMP) (KIEHL, 1979) (equação 5) e o diâmetro médio geométrico (DMG) (KEMPER; ROSENAU, 1986) (equação 6). Após cálculos do DMP, foi realizado cálculo do índice de sensibilidade (IS) (BOLINDER et al., 1999), relacionando DMP das áreas manejadas em comparação aos valores obtidos para área sob mata nativa (equação 7).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (5)$$

onde:

x_i = diâmetro médio das classes (mm);

w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = 10^x$$

$$x = \left[\frac{\sum (n \log d)}{\sum n} \right] \quad (6)$$

onde:

n = massa dos agregados retidos em determinada peneira (g);

d = diâmetro médio de determinada faixa de tamanho do agregado (mm).

$$IS = DMP_t / DMP_r \quad (7)$$

onde:

DMP_t = diâmetro médio ponderado dos agregados da área manejada;

DMP_r = diâmetro médio ponderado da área de referência.

Para avaliação da evolução de C-CO₂ (carbono mineralizável) em laboratório, os agregados do solo foram manualmente separados até toda a amostra passar em conjunto de peneiras de 8 e 4 mm (EMBRAPA, 1997), secos a sombra e armazenados para análise. As amostras dos agregados foram reumedecidas por pulverização com água, duas vezes ao dia (manhã e noite) durante duas semanas (GONÇALVES et al., 2002). Em seguida foi determinada a capacidade de campo segundo o método do funil. Para tal, pesaram-se 30 g de agregados, colocando-os em funil de plástico com 10 cm de diâmetro, vedado com lã de vidro na base para evitar perda de material. Posteriormente os agregados foram saturados com água deionizada. Os funis foram cobertos com filme plástico para minimizar as perdas de água por evaporação, e assim permaneceram por 4-6 horas para drenagem do excesso de água. Em seguida, cerca de 5 g de cada amostra de agregados foram secas em estufa a 105°C até obter-se massa constante. A capacidade de campo foi determinada de acordo com a equação 5:

$$CC = \frac{(P1-P2)}{P2} \quad (5)$$

onde:

CC = capacidade de campo;

P1 = peso da amostra de solo úmida (g); e

P2 = peso da amostra de solo seca (g).

Para a avaliação do C-CO₂ liberado em laboratório, utilizou-se método proposto por Mendonça e Matos (2005), em que 50 g de agregados que ficaram acondicionados na peneira de 4 mm foram colocados em recipientes de vidro de 5000 cm³, fechados herméticamente, com umidade dos agregados ajustada para 65% da capacidade de campo. Os recipientes de vidro (3 repetições por sistema de uso do solo e camada) foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado em laboratório com temperatura mantida a 25 °C por meio de refrigeração. A cada recipiente foi adicionado um frasco contendo 30 mL de solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹, para capturar o C-CO₂ e outro contendo 30 mL de H₂O (para manter a umidade constante).

As coletas foram feitas em intervalos de 24 h nos primeiros 7 dias, de 48 h entre o 8° e 17° dia e de 96 h entre o 18° e 37° dia. Ao abrir os recipientes, retirou-se o frasco contendo NaOH, tomando-se o cuidado para deixar cada recipiente contendo solo aberto por 15 minutos para que ocorra a troca do ar (mantendo este tempo uniforme para todas as amostras). Decorrido o tempo, colocou-se outro frasco contendo 30 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹, e fechou-se hermeticamente o recipiente para nova incubação. Enquanto aguardou-se o tempo para a troca de ar, pipetou-se 10 mL da solução de NaOH (previamente incubada com o solo) para erlenmeyer de 125 mL, sendo em seguida adicionado 10 mL de solução de BaCl₂ 0,05 mol L⁻¹ e três gotas de fenolftaleína 1%, sendo a amostra titulada em seguida com HCl 0,25 mol L⁻¹, conforme efetuado por Loss (2011). O cálculo do C-CO₂ evoluído é apresentado em mg de C-CO₂/100 cm³ de solo (agregados), durante o intervalo utilizado no monitoramento da amostra, conforme apresentado na equação 8 a seguir:

$$C-CO_2 \text{ (mg)} = (B-V) \times M \times 6 \times (V_1/V_2) \quad (8)$$

onde:

B = volume de HCl gasto na titulação do branco (mL);

V = volume de HCl gasto na titulação da amostra (mL);

M = concentração real do HCl (mol L⁻¹);

6 = massa atômica do carbono (12) dividida pelo número de mols de CO₂ que reagem com o NaOH (2);

V₁ = volume total de NaOH usado na captura do CO₂ (mL);

V₂ = volume de NaOH usado na titulação (mL).

Antes da incubação dos agregados do solo, foi quantificado o COT e o N total através de combustão seca por analisador CHNS (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Alemanha), sendo calculada a relação C/N.

5.4.5 Análises Estatísticas

Os resultados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados por meio dos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, em delineamento inteiramente casualizado, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F, e os valores médios foram comparados entre si pelo teste de Tukey a 5%, com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2006).

Como análise complementar, foi utilizada a técnica multivariada por meio da análise canônica, envolvendo as variáveis do fracionamento físico da matéria orgânica do solo, a partir da qual foi reduzido o conjunto de dados em combinações lineares, gerando os escores das duas primeiras variáveis canônicas que explicam mais de 80% da variação total (CRUZ; REGAZZI, 1994), sendo os escores projetados em gráficos bidimensionais. Além dessa técnica, foi ainda utilizado o método de agrupamento de Tocher modificado, com o propósito de discriminar os tratamentos que apresentaram maior similaridade, e também para agrupar os diferentes tipos de manejo a partir da matriz de distância generalizada de Mahalanobis. O gráfico com base na análise canônica foi gerado e os grupos formados por meio do agrupamento de Tocher modificado, utilizando o programa GENES (CRUZ, 2006).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Carbono Orgânico Total, Frações Físicas da Matéria Orgânica e Índice de Manejo de Carbono

Os teores de COT, frações granulométricas da MOS e os valores de IMC foram influenciados pelo diferentes sistemas de manejo (Tabela 2). Verificou-se maiores teores de

COT na camada de 0-0,05 m, principalmente na área de mata e pastagem, 40,78 g kg⁻¹ e 31,56 g kg⁻¹, respectivamente. Esses resultados refletem a contribuição da deposição superficial dos resíduos e maior concentração de raízes das plantas nas camadas superficiais do solo (SALTON et al., 2008). Mesma tendência de maiores teores de COT em camadas superficiais também são observados nas áreas sob SPD, evidenciando a influência da deposição dos resíduos sob a superfície do solo em sistemas de manejo com revolvimento do solo localizado na linha de semeadura (BAYER et al., 2004). Guareschi, Pereira e Perin (2012) em cronosequência de 3, 15 e 20 anos de SPD, também observaram maiores teores de COT em camadas superficiais do solo, chegando a 33,9 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 sob 20 anos de SPD. Mesmo fato também relatado por Benbi et al. (2015) em sistema de sucessão milho-trigo por dez anos, Aratani et al. (2009) em SPD por 5 e 12 anos sob mesmo tipo de solo, e Assis e Lanças (2010) em cronosequência de SPD sob Nitossolo Vermelho.

Para as áreas manejadas em SPD, evidencia-se aumento nos teores de COT em função do tempo de implantação do SPD, principalmente na camada de 0-0,05 m, porém com diferenças somente entre SPD₂₂ e SPD₆. Desta forma, verifica-se que o sistema de sucessão soja (verão) e milho/trigo (inverno), contribui para aumento dos teores de COT principalmente após alcançar a fase de manutenção do sistema (ANGHINONI, 2007). Maiores acúmulos de COT até a camada de 0,1 m também foram observados por Andrade et al. (2010) em SPD após 12 anos de rotação e sucessão de culturas no Sul do Brasil, porém essa tendência não foi verificada por Aratani et al. (2009) e Wendling et al. (2005) sob mesmo tipo de solo nos estados de São Paulo e Minas Gerais, respectivamente. O manejo em SPD é considerado uma das práticas agrícolas mais eficientes em sequestrar e acumular C no solo (WEST; POST, 2002), porém alguns resultados contrastantes são encontrados na literatura, dependendo de fatores tais como rotação de culturas (AZIZ; MAHMOOD; ISLAM, 2013), manejo da adubação nitrogenada (SISTI et al., 2004), condições climáticas, intensidade de revolvimento e quantidade de resíduos aportados na superfície do solo (MARRIOTT; WANDER, 2006).

Nas duas últimas camadas, a área de pastagem apresentou teores superiores de COT, comprovando assim, a contribuição em acúmulo de C em camadas mais profundas pelo sistema radicular das gramíneas ao longo do tempo (SALTON et al., 2008). Na área de M+B mesmo após quatro anos de consórcio com braquiária, não se observou aumento significativo de COT nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m.

Tabela 2 - Teores de carbono orgânico total (COT), carbono da matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica mineral (MOM), índice de estoque de carbono (IEC), labilidade (Lab), índice de labilidade (ILab) e índice de manejo de carbono (IMC) nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistemas de manejo	COT	MOP	MOM	IEC	Lab	ILab	IMC
-----g kg ⁻¹ -----							
0-0,05 m							
SPD ₆	18,78d	4,07d	14,71c	0,46d	0,28b	1,21b	55,14d
SPD ₁₄	20,94d	4,56c	16,38c	0,52d	0,28b	1,21b	61,37d
SPD ₂₂	24,02c	6,19b	17,83c	0,59c	0,35a	1,53a	89,15b
M+B	18,96d	4,94c	14,02c	0,47d	0,36a	1,57a	71,49c
Pastagem	31,56b	5,98b	25,58b	0,78b	0,24b	1,04c	79,09a
Mata	40,78a	7,98a	32,80a	1,00a	0,25b	1,00c	100,00a
CV (%)	4,9	3,5	11,6	5,6	7,8	6,1	6,6
0,05-0,1 m							
SPD ₆	15,90d	3,09d	12,81b	0,61d	0,24b	0,74b	44,75d
SPD ₁₄	16,76cd	2,96d	13,80b	0,64cd	0,22b	0,65b	42,06d
SPD ₂₂	18,24bc	4,99b	13,25b	0,70bc	0,36a	1,08a	76,23b
M+B	17,32cd	4,29c	13,03b	0,66cd	0,33a	1,01a	66,62c
Pastagem	19,60b	4,79b	14,89ab	0,75b	0,33a	0,99a	74,14b
Mata	26,04a	6,45a	19,59a	1,00a	0,33a	1,00a	100,00a
CV (%)	4,9	4,4	16,6	4,2	7,5	6,0	5,0
0,1-0,2 m							
SPD ₆	12,44c	2,83d	9,61b	0,84c	0,30b	0,84c	68,93e
SPD ₁₄	12,72c	2,53e	10,19b	0,85c	0,25b	0,70d	59,34f
SPD ₂₂	14,76bc	4,47a	10,29b	1,00b	0,47a	1,31a	124,54a
M+B	15,82b	4,22b	11,60b	0,80c	0,37ab	1,05b	82,46d
Pastagem	19,82a	4,62a	15,20a	1,34a	0,30ab	0,85c	112,92b
Mata	14,94bc	3,93c	11,01b	1,00b	0,36ab	1,00b	100,00c
CV (%)	9,7	2,9	12,9	5,3	25,4	7,1	5,4
0,2-0,4 m							
SPD ₆	9,82b	2,73c	7,08a	0,91b	0,39b	0,64d	58,15d
SPD ₁₄	10,42b	2,63c	7,79a	0,97b	0,36b	0,59d	54,85d
SPD ₂₂	9,90b	4,01a	5,89a	0,92b	0,69a	1,13a	103,92a
M+B	10,64b	3,57b	7,07a	0,99b	0,52ab	0,87c	86,14c
Pastagem	11,84a	3,94a	7,90a	1,10a	0,50ab	0,83c	92,17bc
Mata	10,78b	4,10a	6,68a	1,00b	0,61a	1,00b	100,00ab
CV (%)	4,9	3,5	20,6	4,5	19,8	6,7	6,3

Médias seguidas de letras iguais na coluna, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Contudo foi constatada semelhança dos teores de COT entre M+B e mata nas camadas 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, sendo o valor quantificado superior ao SPD₆ e SPD₁₄ na cada de 0,1-0,2 m. A ausência de interferência do manejo em consórcio nas camadas superficiais, pode ser decorrente da rápida decomposição da palhada em superfície pelas condições climáticas da região (BLAIR; LEFROY; LISLE, 2000) e da sucessão de espécies cultivadas no verão

(NICOLOSO et al., 2008). Após dois anos de integração lavoura-pecuária sob Latossolo Vermelho no estado de São Paulo, Aratani et al. (2009) não observaram aumentos no conteúdo de COT em relação ao sistema de rotação e sucessão em SPD até a camada de 0,30 m. Em sistemas de rotação de culturais anuais em SPD e pastagens, Salton et al. (2011) verificaram contribuição do consórcio entre culturas e pastagens para aumento dos teores e estoques de COT do solo.

Para as camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, teores superiores de MOP foram encontrados na área de mata, 7,98 e 6,45 g kg⁻¹, respectivamente, seguida das áreas de SPD₂₂ e pastagem, 6,19 e 5,98 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05 m, e 4,99 e 4,79 g kg⁻¹ na camada de 0,05-0,1 m, respectivamente, nos quais representam 19,6, 25,8 e 18,9% do COT na camada de 0-0,05 m e 24,8, 27,4 e 24,4% para a camada de 0,05-0,1 m, respectivamente (Tabela 2). Esses teores de MOP na camada superficial são reflexo do acúmulo de palhada na superfície do solo, associado a mínima perturbação do sistema (CONCEIÇÃO et al., 2005). De forma geral, a sensibilidade da fração MOP evidencia diferenças entre todas as camadas nos sistemas de manejo avaliados, podendo ser utilizada como indicador de qualidade do solo. Tais resultados também foram relatados em sistema de sucessão milho-trigo conduzido durante dez anos por Benbi et al. (2015), e também em experimentos de longa duração sob Argissolo no Sul do Brasil (CONCEIÇÃO et al., 2005) e Latossolo na região dos cerrados (BATISTA et al., 2013).

A reposição de MOP na área de pastagem não se mostrou elevada em função da ausência de manejo adequado (reforma e adubações de manutenção), além do pastejo intensivo desde a sua implantação. Nas áreas sob SPD com sucessão soja, milho/trigo, principalmente para SPD₂₂, os resultados verificados pela MOP se assemelharam aos observados pelo COT, com elevação lenta e gradual em função do tempo de adoção do SPD. Sob condição de clima tropical na região Centro-Oeste que favorece a decomposição mais acelerada dos resíduos vegetais, Guareschi, Pereira e Perin (2013) também não observaram aumentos significativos dos teores e estoques de MOP em áreas com 3, 15 e 20 anos de adoção do SPD no cerrado Goiano.

A fração mineral da MOS (MOM), apresentou representatividade no COT entre 59 e 83%, com maior teor na camada de 0-0,05 m para a área de mata, 32,80 g kg⁻¹, seguida da área de pastagem, 25,58 g kg⁻¹, não havendo diferença entre os sistemas de manejo na camada 0,2-0,4 m. A maior representatividade desta fração em relação a MOP se dá em solos de textura argilosa (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), devendo-se também a contribuição da estabilização de frações como a MOP, visto que, sistemas de manejo com mínimo ou nenhum revolvimento do solo beneficiam os processos de estabilização da MOS (BATISTA et al.,

2013), com conseqüente diminuição da emissão de CO₂ para a atmosfera (BANDYOPADHYAY; LAL, 2014).

Para o IEC, quando os sistemas manejados são comparados com a mata nativa, observa-se aumento do IEC em função do tempo de implantação do SPD para as três primeiras camadas avaliadas, com valores médios de 0,64, 0,67 e 0,76 nas áreas de SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente, com diferenças entre SPD₂₂ e SPD₆ (Tabela 2). Esse padrão comprova o aumento gradual do COT do solo na sucessão soja, milho/trigo. O aumento lento e gradual também foi observado após 6 anos em SPD sob sucessão milho-trigo por Du et al. (2015). Benbi et al. (2015) relataram valores de IEC de 0,65 para a área de SPD, em sucessão de cultivos por dez anos em comparação com Floresta natural. Para o IEC, destaca-se potencial de acúmulo de carbono do sistema radicular da pastagem após longo cultivo, com valores superiores à área de mata nas duas últimas camadas, chegando a 1,34 para a camada de 0,1-0,2 m.

Com relação a labilidade (Lab) da MOS, foram observados valores abaixo da unidade em todas as áreas e camadas avaliadas (Tabela 2). As áreas com maior tempo de adoção do SPD (SPD₂₂ e M+B) apresentaram valores superiores a área de mata na camada de 0-0,05 m, com valores de 0,35 e 0,36, respectivamente. A Lab representa a relação entre a MOP e a MOM, sendo considerada ótimo indicador de qualidade do solo (BENBI et al., 2015), pois enfatiza o equilíbrio entre as frações lábeis e recalcitrantes da MOS (BLAIR et al., 1995), sendo este equilíbrio importante para a manutenção da qualidade dos sistemas produtivos (MAJUMDER; KUZUYAKOV, 2010). Destacam-se também maiores valores de índice de labilidade (ILab) nas áreas sob maior tempo de condução em SPD, especialmente a área de SPD₂₂, variando de 1,08 a 1,53, sendo superiores a área de mata em todas as camadas, com exceção para a camada de 0,05-0,1 m.

O índice de manejo de carbono (IMC) engloba as frações granulométricas e os índices de labilidade da MOS, dentro dos sistemas de manejo. A área de SPD₂₂ apresentou valores entre 76,23 a 124,54, sendo superior a área de mata na camada de 0,1-0,2 m (Tabela 2), com média na seção de 0-0,4 m de 98,5, próximo ao índice 100 da área de mata, considerado ideal (BLAIR et al., 1995). Esse resultado demonstra a melhoria nos atributos do solo, principalmente na qualidade da fração orgânica, que influencia de forma expressiva atributos como capacidade de retenção de água, agregação do solo e atividade biológica (SÁ et al., 2004) após 20 anos de condução do SPD (fase de manutenção) (ANGHINONI, 2007). Baixos valores de IMC foram encontrados por Benbi et al. (2015) em sistema de sucessão de culturas apenas com gramíneas.

Quando se avalia os estoques de C das frações granulométricas da MOS (Figura 4), observam-se valores superiores de MOP para a área de mata nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1

m, 3,97 e 3,12 Mg ha⁻¹, respectivamente. Dentre os sistemas de manejo em sucessão soja, milho/trigo, houve diferença para todas as camadas somente para SPD₂₂ e as demais, com valores totais na seção de 0-0,4 m de 12,22, 12,05 e 18,75 Mg ha⁻¹ nas áreas de SPD₆, SPD₁₄ e SPD₂₂, respectivamente. É desejável que o solo apresente adequada quantidade de C na fração particulada, pois garante fluxo de C ao solo para manutenção da atividade biológica (BATISTA et al., 2013).

Como o desmatamento ocorreu em 1974, as áreas com menores tempos de adoção do SPD geraram menores teores (Tabela 2) e estoques (Figura 4) de MOP, conseqüentemente, índices de agregação inferiores (Tabela 3) em relação a área de SPD₂₂. Nos menores tempos de implantação, SPD₆ e SPD₁₄, os processos de agregação do solo ainda estão em evolução, pois antes da implantação do SPD, o longo período de revolvimento do solo em sistema convencional acarretou desagregação do solo e exposição da MOP (SIX et al., 2004). Áreas com mínimo ou nenhum revolvimento solo criam unidades estruturais maiores (TISDALL; OADES, 1982) conseqüentemente, protegem a MOP da oxidação no interior dos agregados (BRONICK; LAL, 2005).

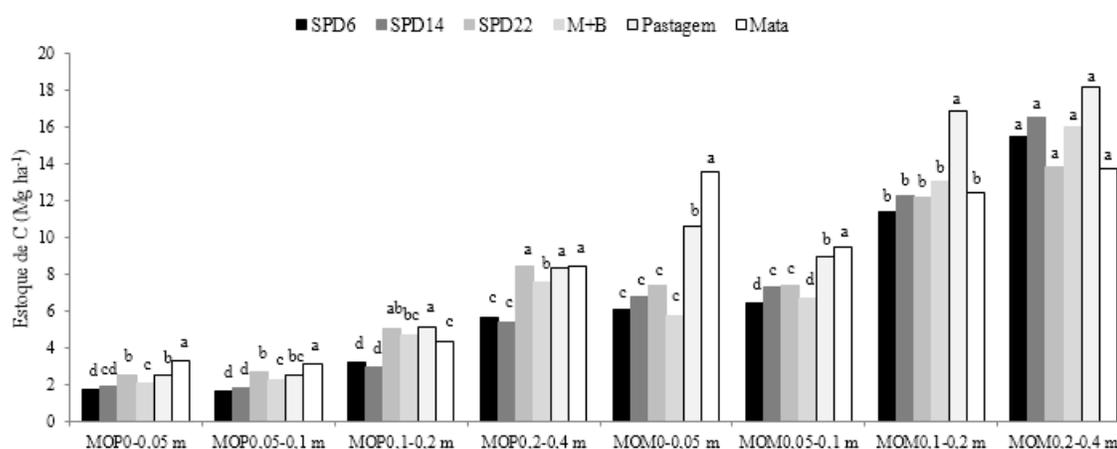


Figura 4 - Estoque de carbono da matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica mineral (MOM) do solo nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná. Médias seguidas de letras iguais, para cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Para os estoques de carbono da MOM, observa-se menor sensibilidade desta fração em identificar diferenças nos sistemas de manejo em relação a MOP (Figura 4). Esta fração apresenta avançado estágio de humificação sendo altamente estável devido a interação com a fração mineral e localização no interior de microagregados estáveis (BAYER et al., 2004). Essa característica fica evidente quando se avalia os sistemas de manejo em sucessão, com diferenças

somente na camada de 0,05-0,1 m. A área de mata apresenta os maiores estoques de MOM nas camadas de 0-0,05 m ($13,61 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 0,05-0,1 m ($9,49 \text{ Mg ha}^{-1}$) e a área de pastagem na camada de 0,1-0,2 m ($16,87 \text{ Mg ha}^{-1}$). Maiores estoques de MOM e MOP influenciam na estabilização de micro e macroagregados, respectivamente, de acordo com a teoria da hierarquia de agregados (TISDALL; OADES, 1982), complementada por Oades (1984).

Pela análise canônica em função dos atributos relacionados as frações físicas da MOS (Figura 5), a primeira e a segunda variável corresponderam a 67,74 e 30,08% da variação, representando 97,82% da variação total, atingindo o requisito mínimo de 80% proposto por Cruz e Regazzi (1994) para avaliação por meio de dispersão gráfica bidimensional. Pelo agrupamento de Tocher modificado, foram evidenciados a formação de três grupos distintos, um formado pelas áreas de SPD₆ e SPD₁₄, outro pelas áreas de SPD₂₂ e M+B, e um terceiro com as áreas de pastagem e mata nativa, sendo que as variáveis que mais contribuíram para a discriminação das áreas foram os teores de COT e MOP, além do estoque de MOM. Esse padrão evidencia a sensibilidade das frações físicas da MOS e suas respectivas relações e estoques, em detectar mudanças nos sistemas de manejo ao longo do tempo, como demonstrado em vários trabalhos recentes na literatura (BENBI et al., 2015; CONCEIÇÃO et al., 2014; LOSS et al., 2014), principalmente com relação a fração mais lábil do C, ou seja, a fração particulada da MOS (BATISTA et al., 2013; CONCEIÇÃO et al., 2005).

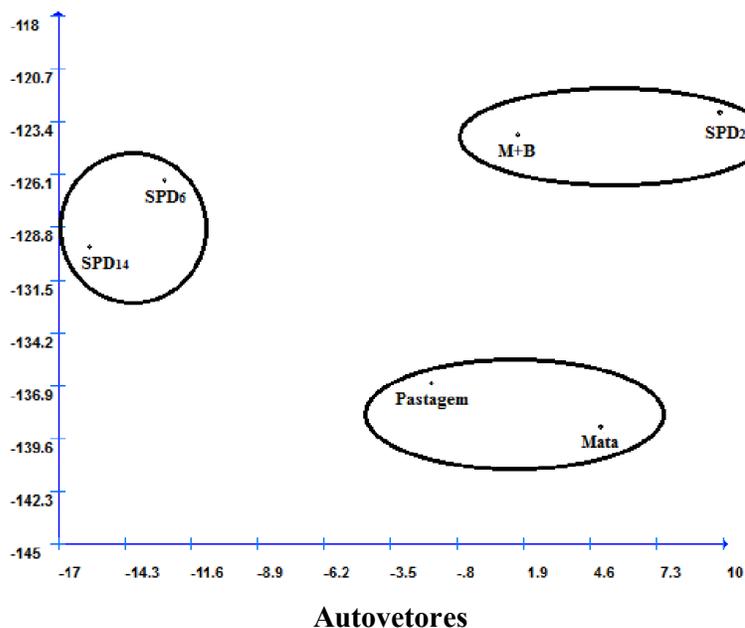


Figura 5 - Dispersão dos diferentes sistemas de uso e manejo e agrupamento pelo método de Tocher modificado das duas primeiras variáveis canônicas em função das frações físicas da matéria orgânica do solo em Latossolo Vermelho Eutroférico típico, nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná.

5.5.2 Estabilidade de Agregados e Carbono Mineralizável

O estado de agregação do solo, avaliado pelos índices DMP, DMG e porcentagem de agregados retidos nas classes de peneiras permitiu identificar diferenças entre os sistemas de manejo avaliados (Tabela 3). Tanto para o DMP, DMG e porcentagem de agregados maiores que 2 mm, as áreas de mata e pastagem apresentaram os maiores valores, diferindo dos demais sistemas de manejo, chegando a valores de 4,86 e 4,67 mm para o DMP e DMG, respectivamente, e 96,56% de agregados maiores que 2 mm, na profundidade de 0,05-0,1 m no solo sob mata. A menor perturbação do solo, além dos maiores teores de C das frações mais grosseiras (Tabela 2) são responsáveis pela estabilização de agregados de maior tamanho (SIX et al., 2004). Isso justifica maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm nas áreas de mata e pastagem em relação as demais áreas cultivadas (Tabela 3), tendo relação direta com os maiores teores de MOP (Tabela 2), o que corrobora com a teoria de Oades (1984), confirmada em trabalho recente sob Latossolos por Rabbi et al. (2015), também relatado por Barreto et al. (2009) e Andrade et al. (2010) no Sul do Brasil e Assis et al. (2006) sob Latossolo na região Sudeste. Este mesmo padrão de maiores índices de agregação nas áreas de referência também foram observados por Aratani et al. (2009) sob Latossolo Vermelho na região Sudeste do Brasil.

Tabela 3 - Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e porcentagem de agregados retidos nas peneiras de 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,125 mm nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Sistemas de manejo	DMP	DMG	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm
	-----mm-----		-----%-----				
	0-0,05 m						
SPD ₆	2,58c	1,58c	42,22c	15,17a	23,35a	13,92a	5,34a
SPD ₁₄	3,45b	2,47b	61,90b	15,05a	13,35b	6,28b	3,43b
SPD ₂₂	3,66b	2,79b	65,94b	19,06a	7,51c	3,98bc	3,51b
M+B	3,73b	2,87b	67,88b	17,19a	7,23c	4,10bc	3,61ab
Pastagem	4,72a	4,42a	93,08a	3,49b	1,57d	1,02c	0,84c
Mata	4,57a	4,33a	91,97a	3,25b	2,30cd	1,43c	1,05c
CV (%)	8,5	14,7	11,2	27,6	29,8	32,8	31,4
	0,05-0,1 m						
SPD ₆	2,29c	1,46c	32,72c	30,51a	19,92a	10,23a	6,62a
SPD ₁₄	2,85bc	1,93bc	46,79b	21,69bc	20,03a	8,18a	3,29c
SPD ₂₂	3,15b	2,24b	53,17b	25,00ab	11,87b	5,40b	4,55b
M+B	3,19b	2,21b	55,56b	17,49c	15,68ab	7,83ab	3,53c
Pastagem	4,62a	4,22a	90,64a	3,98d	3,04c	1,58c	0,76d
Mata	4,86a	4,67a	96,56a	1,18d	1,09c	0,68c	0,49d
CV (%)	8,3	10,4	11,4	21,3	22,8	23,0	16,8

Médias seguidas de letras iguais, na coluna para cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Na área de mata, este padrão é decorrente do aporte de material orgânico ao longo do tempo, pois se encontra sob condição original do solo, sem interferência de qualquer forma de cultivo. A formação de agregados estáveis e de maior tamanho (Tabela 3), está diretamente relacionada a estabilização do COT no solo (OADES 1984; TISDALL; OADES, 1982), também com contribuição das frações mais humificadas da MOS, como a MOM (Tabela 2), tendência também observada por Assis et al. (2006) em áreas com cultivo sucessivo de SPD com soja/milho/pastagem por 4 anos em relação a área de mata sob Latossolo Vermelho.

É evidente destacar também a evolução destes atributos em função do tempo de adoção do SPD, com os menores valores para a área de SPD₆, sendo diferente das demais áreas nas duas camadas avaliadas para a porcentagem de agregados maiores que 2 mm, e semelhante à área de SPD₁₄ para o DMP e DMG na camada de 0,05-0,1 m. Esse padrão é justificado pelos menores teores de COT, MOP e MOM (Tabela 2) e estoques de MOP e MOM (Figura 4), onde a ruptura dos agregados ainda no sistema de cultivo convencional por longa data causou perdas de C, sendo essas variáveis associadas entre si (SIX; PAUSTIAN, 2014). A utilização de sistemas de cultivo com menor revolvimento do solo e que promovam incremento de C ao longo do tempo (BARRETO et al., 2009), como o SPD, pode contribuir para o aumento da estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, para a melhoria gradual da qualidade física do solo (BHATTACHARYYA et al., 2009), como também observado por Andrade et al. (2010) em sistemas de sucessão e rotação de culturas em SPD por 12 anos; Aratani et al. (2009) sob Latossolo Vermelho de textura muito argilosa e Assis e Lanças (2010) em cronossequência de 1, 4, 5 e 12 anos de SPD.

Desta forma, o SPD contribui para a melhoria da qualidade estrutural do solo ao longo dos anos de cultivo no sistema de sucessão soja, milho/trigo, com resultados significativos a partir do 14º ano de condução, sendo este, semelhante as áreas de SPD₂₂ e M+B nas duas camadas avaliadas. Interferências antrópicas em sistemas de manejo levam certo tempo para que a melhoria dos atributos do solo se estabeleça (BARRETO et al., 2009), ou seja, se tornem positivas (BRONICK; LAL, 2005), fato que corrobora em função do tempo de adoção do SPD (ANGHINONI, 2007).

Mesmo não diferindo, observa-se elevação nos valores de DMP, DMG e porcentagem de agregados maiores de 2 mm na área de M+B quando se compara com a área de SPD₂₂, mesmo sendo convertida para SPD somente seis anos após. Esse fato evidencia aumento da estabilidade estrutural do solo pela ação do sistema radicular mais abundante e agressivo da *Brachiaria* no sistema de consórcio com o milho. De forma geral, as gramíneas exercem

benefícios expressivos à agregação do solo (ALBUQUERQUE et al., 2001), como relatado também na rotação de culturas anuais e pastagens no estado de Mato Grosso do Sul (SALTON et al., 2008).

Com relação ao índice de sensibilidade (IS), apenas a área de pastagem apresentou valores semelhantes à área de mata, com valores de 1,02 e 0,95 nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, respectivamente (Figura 5). Para a camada de 0-0,05 m, os menores valores do IS encontram-se na área de SPD₆, com valor de 0,56, porém não diferindo da área de SPD₁₄. De modo geral, dentre as áreas de cultivo em SPD, se observa evolução deste índice em função do tempo de adoção, passando de 0,56, 0,74, 0,79 e 0,81 na camada de 0-0,05 m e, 0,47, 0,59, 0,65 e 0,66 para a camada de 0,05-0,1 m nas áreas de SPD₆, SPD₁₄, SPD₂₂ e M+B, respectivamente. Essa mesma tendência foi observada por Aratani et al. (2009) em relação ao tempo de adoção do SPD. Após seis anos de cultivo em SPD, Bertol et al. (2004) quantificaram valores de IS próximos a unidade, porém não diferindo entre sistemas de rotação ou sucessão de culturas.

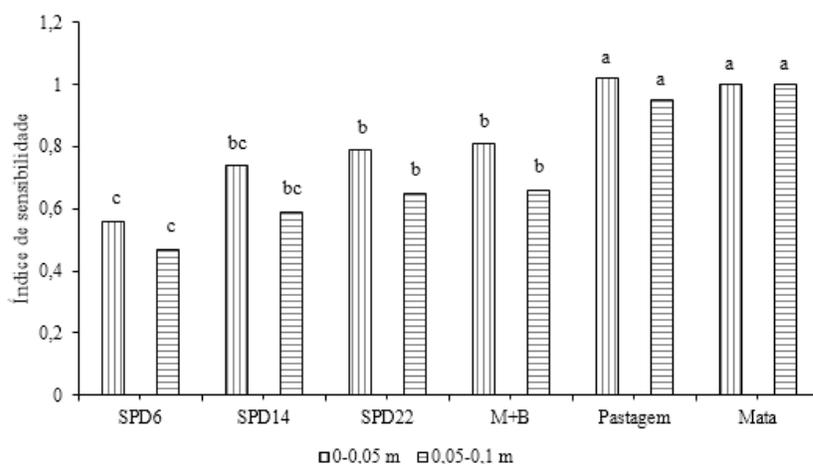


Figura 5 - Índice de sensibilidade (IS) do solo das áreas manejadas em comparação com a área de referência (mata). Médias seguidas de letras iguais, para cada profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Esta maior estabilidade estrutural, especialmente das áreas de SPD₂₂, pastagem e mata (Tabela 3, Figura 5), devem-se também aos maiores teores de COT destes agregados (Tabela 4), especialmente na camada de 0-0,05 m, sendo diferentes das demais, com valores de 24,57, 24,67 e 36,23 g kg⁻¹, respectivamente. Mesma tendência também foi observada em área de mata e SPD com 12 anos de sucessão soja-trigo sob Latossolo Vermelho no Sul do Brasil por Barreto et al. (2009) e Loss et al (2013) na região Centro-Oeste brasileira. Maiores teores de COT em agregados aumentam a agregação do solo, pois o COT age como agente cimentante entre as

partículas minerais do solo (BRONICK; LAL, 2005) tendo papel fundamental na melhoria da qualidade estrutural do solo (SIX et al., 2004).

Destaca-se a qualidade dos resíduos depositados ao solo, especialmente na área de mata, a qual apresenta os maiores teores de N ($3,32$ e $2,29$ g kg⁻¹) nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, respectivamente (Tabela 4). Isso se deve a maior heterogeneidade florística dos resíduos depositados sobre o solo nesta área, com reflexos também nos valores da relação C/N. O sistema de sucessão soja, milho/trigo, por ter apenas uma espécie leguminosa no sistema, não contribui de maneira significativa para aumento nos teores de N dos agregados, com diferenças apenas para SPD₆ em relação as demais da cronossequência, com reflexos inclusive no aumento da relação C/N entre as áreas de SPD₁₄ e SPD₂₂ na camada de 0-0,05 m. Da mesma forma, em sistema de sucessão com gramíneas por dez anos, Benbi et al. (2015) não observaram aumento na qualidade do material orgânico aportado ao solo em comparação com área de agrofloresta.

Tabela 4 - Carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) dos agregados nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Profundidade (m)	Sistemas de uso do solo						CV(%)
	SPD ₆	SPD ₁₄	SPD ₂₂	M+B	Pastagem	Mata	
	COT (g kg ⁻¹)						
0-0,05	19,07c	19,97c	24,57b	20,00c	24,67b	36,23a	2,48
0,05-0,1	15,90d	16,13d	18,60c	18,10c	19,90b	24,23a	2,34
	N (g kg ⁻¹)						
0-0,05	1,55d	1,88c	1,96c	1,76cd	2,24b	3,32a	3,71
0,05-0,1	1,31c	1,67b	1,76b	1,77b	1,84b	2,29a	5,86
	C/N						
0-0,05	12,30a	10,62b	12,54a	11,36ab	11,01b	10,91b	4,12
0,05-0,1	12,14a	9,66b	10,56ab	10,23b	10,82ab	10,58ab	5,63

Médias seguidas de letras iguais na linha, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Os menores teores de N nos agregados, especialmente na área de SPD₆ devem-se a menor estabilidade estrutural do solo nesta área (Tabela 3; Figura 5), pois o solo esta em fase de reagregação (6 anos) após os distúrbios causados pelo SPC. Quanto maior o distúrbio do solo, maior a quebra de agregados, consequentemente à exposição do N da MOS, sendo perdido por lixiviação e volatilização (ONWEREMADU; ONYIA; ANIKWE, 2007), uma vez que há formação de nichos de C e N no interior de agregados estáveis (RESCK et al., 2008). Outra forma de aumentar os teores de N no solo é a utilização de sistemas de culturas mais diversificados, como relatado por Sisti et al. (2004) e Boddey et al. (2010) sob SPD ao longo do tempo com mesmo tipo de solo no Sul do Brasil, evidenciando a melhoria dos atributos químicos do solo. Especificamente para a área de pastagem na camada de 0-0,05 m, os dejetos

bovinos depositados ao solo ao longo dos pastejos, contribuem para o maior teor de N, 2,24 g kg⁻¹, em relação as áreas sob SPD, como também relatado por Salton et al. (2005).

Mudanças na quantidade e qualidade da MOS sob diferentes usos, tem influência da quantidade e atividade microbiana com reflexos na evolução de C-CO₂ de agregados incubados em laboratório. As amostras oriundas das áreas de mata e pastagem apresentaram os maiores valores para C-CO₂ logo após a incubação (1 dia) nas duas camadas avaliadas (Figura 6a,b), com valores de 94 e 71% superiores a SPD₂₂, respectivamente. Essa tendência também foi observada por Barreto et al. (2009), Loss et al. (2013) e Bandyopadhyay e Lal (2014) comparando área de mata e SPD de longa duração.

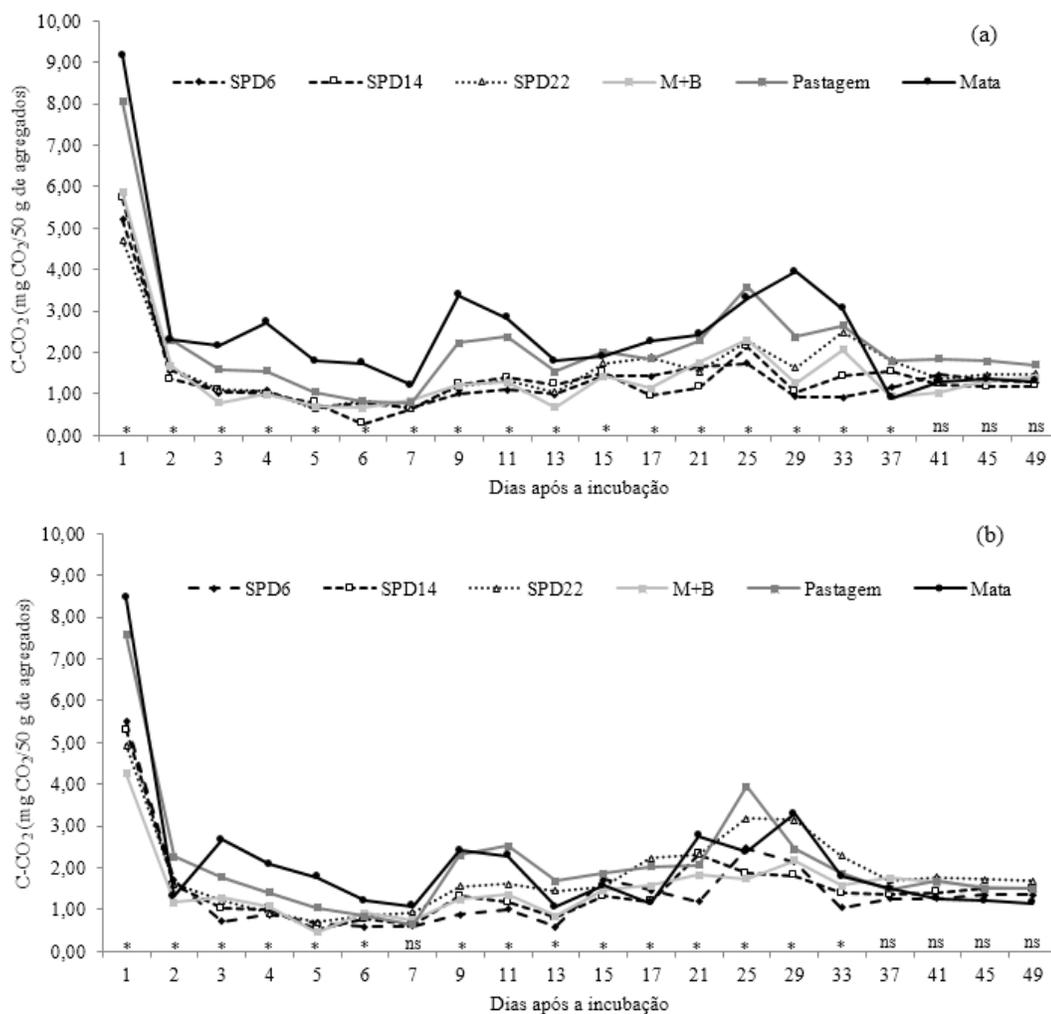


Figura 6 - Evolução diária de C-CO₂ nas amostras de agregados (a = camada de 0-0,05 m e b = 0,05-0,1 m) incubados até os 49 dias de avaliação, nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná. * = significativo pelo teste Tukey a 5%; ns = não significativo pelo teste F a 5%.

A maior liberação de C-CO₂ esta relacionada aos maiores teores de MOP do solo (Tabela 2), COT e N dos agregados (Tabela 4), sendo mais evidente na camada de 0-0,05 m. De acordo com Kuzyakov, Fridel e Stahr (2000) esse padrão é conhecido como “*priming*”, em que a estimulação da atividade microbiana pela adição de resíduos orgânicos prontamente decomponível, favorece a aceleração da decomposição da MOS. Estas características associadas, beneficiam os microrganismos decompositores do material vegetal, no primeiro estágio de decomposição, influenciando posterior estabilização da MOS em frações associadas aos minerais (Tabela 2).

Entre o 9º e 11º e 21º e 29º dias de incubação, para as duas camadas, foram verificados picos de evolução de C-CO₂ (Figura 6a,b), principalmente nas áreas com menor interferência antrópica e, conseqüentemente com agregados de maior tamanho (mata e pastagem) (Tabela 4). Esse padrão pode ser devido a morte de alguns microrganismos, pois a evolução de C-CO₂ foi gradativamente reduzindo em períodos anteriores a esses. Com a morte dos microrganismos possivelmente estes serviram de alimento para os remanescentes (GONÇALVES et al., 2002), o que originou maiores valores de liberações posteriores (picos). Em áreas de SPD por 16 anos e mata nativa, Bandyopadhyay e Lal (2014) também relataram maior evolução de C-CO₂ em agregados de maiores tamanhos. A partir do 41º dia para a camada de 0-0,05 m (Figura 5a), e 37º dia para as amostras oriundas da camada de 0,05-0,1 m (Figura 5b), evidencia-se a ocorrência da estabilização da respiração microbiana. Para o mesmo tipo de solo, está estabilização ocorreu posterior ao observado por Loss et al. (2013) ao 25º dia.

O maior acúmulo de C-CO₂ ao final do período de incubação para as amostras da camada de 0-0,05 m ocorreu na área de mata, 50,79 mg CO₂ por 50 g agregados, seguida da área de pastagem (Tabela 5), diferentemente do observado por Benbi et al. (2015), na qual as amostras das áreas manejadas apresentaram maiores evoluções de CO₂ após 32 dias de incubação. Loss et al. (2013) para o mesmo tipo de solo na região dos cerrados, também observaram maiores valores para acúmulo de C-CO₂ em amostras da área sob vegetação nativa em comparação ao sistema SPD nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m.

Tabela 5 - Acúmulo* de C-CO₂ (mg CO₂/50g de agregados) durante todo o período de incubação dos agregados do solo nos diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná

Profundidade (m)	Sistemas de uso do solo						CV(%)
	SPD 6	SPD 14	SPD 22	M+B	Pastagem	Mata	
0-0,05	27,47d	28,01d	31,77c	29,30cd	44,13b	50,79a	3,02
0,05-0,1	28,30c	29,72c	37,35b	30,11c	42,42a	42,34a	2,18

*Médias de três repetições. Letras iguais na linha, em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05). CV: coeficiente de variação.

Para a camada de 0,05-0,1 m, verificou-se o mesmo padrão para as amostras das áreas de mata e pastagem, diferindo das áreas sob SPD. Para as duas camadas, em média, as amostras da área de mata foram superiores em 34% no acúmulo de C-CO₂ em comparação a área de SPD₂₂, valor este, inferior ao observado por Bandopadhyay e Lal (2014) comparando áreas de mata e SPD por 16 anos. Os autores verificaram um valor inferior em 81%. Com o tempo de implantação do SPD, observa-se aumento do acúmulo de C-CO₂, com diferenças especialmente nas amostras da área de SPD₂₂ em comparação as demais. Os teores de COT e MOP (matéria orgânica de mais fácil decomposição) (BARRETO et al., 2009) (Tabela 2) e COT e N total nos agregados (Tabela 4) destas áreas e camadas favorecem esse padrão.

5.6 CONCLUSÕES

Os maiores valores para carbono orgânico total e teores e estoques de carbono das frações particulada e mineral da matéria orgânica do solo, melhores índices de agregação e atividade biológica em agregados incubados foram obtidos nas áreas de mata e pastagem em comparação com os demais sistemas de manejo.

A sucessão de culturas em cronosequência de sistema plantio direto, especialmente após 22 anos de condução, contribui de maneira lenta para aumento dos teores de carbono orgânico total, matéria orgânica particulada e mineral, melhoria nos índices de agregação e índices de manejo de carbono.

O sistema de consórcio milho e braquiária com quatro anos de implantação é eficiente na melhoria da agregação do solo, e não se mostra eficiente em aumentar os teores e estoques de matéria orgânica do solo em comparação à sucessão de culturas, levando maior tempo para que tais alterações ocorram.

5.7 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 717-723, 2001.

ANDRADE, A. P.; MAFRA, Á. L.; BALDO, G. R.; PICCOLLA, C. D.; BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A. Physical properties of a humic cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 219-226, 2010.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap 6, p. 873-928.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 677-687, 2009.

ASSIS, C. P.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono e nitrogênio em agregados de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1541-1550, 2006.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Agregação de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 58-66, 2010.

AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 131, n. 7, p. 28-35, 2013.

BANDYOPADHYAY, K. K.; LAL, R. Effect of land use management on greenhouse gas emissions from water stable aggregates. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232-234, n. 11, p. 363-372, 2014.

BARRETO, R. C.; MADARI, B. E.; MADDOCK, J. E. L.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; FRANCHINI, J.; COSTA, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 132, n. 3-4, p. 243-251, 2009.

BATISTA, I.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; ROWS, J. R. C. Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, suplemento 1, p. 3377-3388, 2013.

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, p. 677-683, 2004.

BENBI, D. K.; BRAR, K.; TOOR, A. S.; SINGH, P. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in northern India. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237-238, n. 1, p. 149-158, 2015.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; SRIVASTVA, A. K.; GUPTA, H. S. Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the indian himalayayas under

different tillage and crop regimes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 132, n. 1-2, p. 126-134, 2009.

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

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 183-191, 2000.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; 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**, Illinois, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 37-45, 1999.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p.3-22, 2005.

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

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD-ROM.

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

CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 5, p. 794-800, 2014.

CRUZ, C. D. **Programa genes: biometria**. Viçosa: UFV, 2006. 382 p.

DU, Z.; REN, T.; HU, C.; ZHANG, Q. Transition from intensive tillage to no-till enhances carbon sequestration in microaggregates of surface soil in the North China Plain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, Part A, p. 26-31, 2015.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 909-920, 2012.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2615-2628, 2013.

GONÇALVES, A. S.; MONTEIRO, M. T.; GUERRA, J. G. M.; DE-POLLI, H. Biomassa microbiana em amostras de solos secadas ao ar e reumedecidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 651-658, 2002.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. cap. 9, p. 449-510.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap 17, p.425-443.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 263 p.

KUZYAKOV, Y.; FRIDEL, J. K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 32, n. 11-12, p. 1485-1498, 2000.

LAL, R.; FOLLET, R. F.; KIMBLE, J. M. Achieving soil carbon sequestration in the United States. A challenge to policy makers. **Soil Science**, Philadelphia, v. 168, n. 12, p. 827-845, 2003.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Carbono mineralizável, carbono orgânico e nitrogênio em macroagregados de Latossolo sob diferentes sistemas de uso do solo no Cerrado Goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2153-2168, 2013.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no paraná, brasil. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 43-54, 2014.

MAJUMDER, B.; KUZYAKOV, Y. Effect of fertilization on decomposition of ¹⁴C labelled plant residues and their incorporation into soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, n. 2, p. 94-102, 2010.

MARRIOTT, E. E.; WANDER, M. M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 3, p. 950-959, 2006.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Ponte Nova: D & M Gráfica e Editora Ltda, 2005. 107 p.

MUELLER, L.; SHEPHERD, G.; SCHINDLER, U.; BALL, B. C.; MUNKHOLM, L. J.; HENNINGS, V.; SMOLENTSEVA, E.; RUKHOVIC, O.; LUKIN, S.; HU, C. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, n. 3, p. 74-84, 2013.

NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; LANZANOVA, M. E. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2425-2433, 2008.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability, mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 76, n. 1-3, p. 319-337, 1984.

ONWEREMADU, E. U.; ONYIA, V. N.; ANIKWE, M. A. N. Carbon and nitrogen distribution in water-stable aggregates under two tillage techniques in Fluvisols of Owerri area, southeastern Nigeria. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 195-206, 2007.

RABBI, S. M. F.; WILSON, B. R.; LOCKWOOD, P. V.; DANIEL, H.; YOUNG, I. M. Aggregate hierarchy and carbon mineralization in two Oxisols of New South Wales, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, Part B, p. 193-203, 2015.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no cerrado. In: SANTOS, G. A.; SILVA, A. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. Cap. 21, p. 359-417.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E.; BUCKNER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M. F. M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S. P.; PAULLETI, V.; SIQUEIRA NETO, M. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 84, n. 1, p. 45-61, 2004.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** 29. 2005. 58 p.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

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.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. A4-A9, 2014.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates. **Journal of Soil Science**, San Francisco, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1930-1946, 2002.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society Agronomy**, Madison, v. 28, n. 1, p. 337-351, 1936.

6 CONCLUSÕES GERAIS

1. Modificações nos atributos físicos do solo são verificados nas áreas manejadas em relação a área sob vegetação nativa, especialmente o aumento da densidade e compactação do solo em camadas subsuperficiais.
2. Quando adotado corretamente, seguindo as práticas de correção e adubação, o sistema plantio direto contribui para a melhoria dos atributos químicos do solo.
3. O sistema de sucessão de culturas soja (verão) e milho/trigo (inverno) em sistema plantio direto proporciona aumento lento e gradual nos teores e estoques de carbono orgânico total do solo.
4. Houve evolução no processo de humificação da matéria orgânica do solo em função do tempo de adoção do sistema plantio direto, com maiores teores e estoques das frações mais recalcitrantes do carbono.
5. As frações mais lábeis do carbono, principalmente a fração associada a areia (MOP) e a fração F1, se mostram como ótimos indicadores de qualidade das áreas de estudo, com contribuição para evidenciar diferenças nos sistemas de manejo adotados.
6. Os sistemas conservacionistas de manejo proporcionam equilíbrio entre as frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo.
7. Com o tempo de implantação do sistema plantio direto, as áreas no sistema de sucessão de culturas apresentam melhoria nos índices de manejo de carbono e de agregação do solo.
8. O sistema de consórcio milho e braquiária nos cultivos de inverno se mostra eficiente na melhoria de aspectos estruturais do solo, porém a contribuição efetiva deste consórcio para aumento dos teores e estoques de carbono do solo se dá em tempo superior a quatro anos de cultivo.
9. De maneira geral, a melhoria na qualidade edáfica das áreas estudadas especialmente sob sistema plantio direto se manifesta de forma lenta, com melhores indicadores após 22 anos de cultivo.

7 CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. Modificações estruturais do solo são comuns quando existe substituição de ecossistemas naturais e implantação de agroecossistemas com culturas. Após o desmatamento das áreas manejadas realizado no ano de 1974, especialmente nas áreas que atualmente são cultivadas em sistema plantio direto, houve intenso revolvimento do solo, além da prática de queima da palhada proveniente das culturas por longo período de tempo (técnicas disponíveis na época), o que causou desestruturação do solo, e perda da qualidade física das áreas manejadas. Associado ao intenso revolvimento do solo praticado nas áreas sob sistema plantio convencional, após a conversão do sistema de manejo do solo, o tráfego de máquinas de grande porte e o elevado teor de argila, associado a inobservância no teor de umidade excessiva do solo, principalmente na prática da colheita em épocas chuvosas ao longo do tempo, e a não utilização de um sistema de rotação de culturas mais diversificado em função de diferentes formas de exploração do solo pelo sistema radicular, são causas das modificações significativas nos atributos físicos do solo, em especial a contribuição para o surgimento de camadas compactadas em subsuperfície.
2. Fica evidente a importância de boas práticas de adubação e correção do solo, aliadas a adoção de sistemas conservacionistas de manejo como o sistema plantio direto. Estas técnicas, quando aplicadas em conjunto, promovem melhorias na qualidade química do solo ao longo do tempo. Essas melhorias nos atributos edáficos, decorrentes da manutenção de cobertura vegetal sobre a superfície do solo e sua constante decomposição/mineralização, ocasionam ao longo do tempo, diminuição das doses de fertilizantes aplicados, sem comprometer a produtividade das culturas.
3. O aumento dos teores e estoques de carbono de forma significativa se deram após 22 anos de condução do sistema de plantio direto. Essa recuperação lenta dos teores e estoques de carbono após a conversão do sistema de manejo do solo, deve-se principalmente à característica do sistema de sucessão de culturas adotado, especialmente em qualidade, (soja no verão e milho/trigo no inverno), em função de não haver um sistema de rotação de culturas mais diversificado.
4. Sistemas de manejo que promovam ao mesmo tempo, deposição contínua de resíduos vegetais, aliado ao não revolvimento do solo, proporcionam equilíbrio na distribuição das frações químicas e físicas da matéria orgânica (lábeis e recalcitrantes), característica essa, importante para a melhoria dos atributos edáficos. Esse fato evidencia o benefício

no processo de humificação da matéria orgânica do solo, pois a contínua deposição de restos vegetais gera frações de maior labilidade, que servem de alimento para a biota do solo, conseqüentemente, com benefícios na ciclagem de nutrientes e formação de macroagregados. Com o passar do processo de humificação, ocorre também a estabilização do carbono em frações mais recalcitrantes, com benefícios na preservação do carbono no solo por longo período, além da formação e estabilização de microagregados.

5. Os benefícios da implantação de sistemas conservacionistas de manejo, especialmente na qualidade da matéria orgânica do solo, se dão ao longo do tempo, principalmente após 20 anos de condução (fase de manutenção). Este fato consolida a teoria das fases de implantação do sistema plantio direto proposta por Anghinoni (2007), particularmente quando se cumprem as exigências de condução do sistema.
6. A possível inserção de maior diversidade de espécies vegetais adaptadas a região, considerando as particularidades de clima e solo, e/ou a inserção do consórcio milho e braquiária ao longo dos anos, principalmente nos cultivos de inverno, tornam-se alternativas viáveis para a melhoria da qualidade do solo. Citam-se como exemplos de espécies que podem ser cultivadas na região e auxiliar nos processos de descompactação do solo e estabilidade estrutural do solo, aumento da ciclagem de nutrientes e matéria orgânica do solo, o nabo forrageiro, aveia e a *Brachiaria ruziziensis*, e outras culturas como o tremoço, ervilhaca, crambe e canola. Porém, o tradicionalismo deste sistema de cultivo, escassez de maquinários adaptados e recomendações técnicas específicas, além da característica imediatista dos produtores, dificultam a inserção destas culturas no sistema de rotação. A partir disto, modificações no sistema de manejo cultural adotado atualmente demanda planejamento da propriedade a médio e longo prazo.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Diferentes sistemas de manejo estudados, Guaíra - PR. Fotos: Jean Sérgio Rosset



Sistema Plantio Direto com 6 anos (SPD₆)



Sistema Plantio Direto com 14 anos (SPD₁₄)



Sistema Plantio Direto com 22 anos (SPD₂₂)



Sistema Plantio Direto com 12 anos + 4 anos de integração milho+braquiária (SPD₂₂+M+B₄) - (M+B)



Pastagem



Mata Nativa