

Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo

Loss, Arcângelo^{1,3}; Elias Mendes Costa²; Marcos Gervasio Pereira²; Sidinei Julio Beutler²

¹ Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Catarina, Itacorubi, 88034-000, Florianópolis, SC, Brasil; ² Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus Universitário, 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil; ³arcangelo.loss@ufsc.br; arcangeloloss@yahoo.com.br

Loss, Arcângelo; Elias Mendes Costa; Marcos Gervasio Pereira; Sidinei Julio Beutler (2014) Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (1): 1-8

A dinâmica da agregação do solo, assim como os teores de matéria orgânica leve (MOL), carbono orgânico total (COT) e carbono potencialmente mineralizável são influenciados pelos sistemas de manejo do solo. Este trabalho objetivou avaliar a agregação do solo e quantificar os teores de MOL em água, COT e o carbono mineralizável (evolução de C-CO₂) em diferentes sistemas de uso do solo em Marmeleiro, Paraná, Brasil. Foram avaliados um sistema plantio direto (SPD), sistema de preparo convencional (SPC), floresta secundária e pastagem (*Axonopus compressus*). Amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Avaliaram-se o diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), a MOL, o COT e o carbono mineralizável (C-CO₂). Os menores valores de DMP, DMG, MOL, COT e C-CO₂ foram encontrados no SPC. O SPD apresentou maiores valores de DMP, DMG, COT e acúmulo de C-CO₂ que a área de floresta (5-10 cm). O SPC reduz os índices de agregação (DMP e DMG) e os teores de MOL e COT em relação à área de floresta e o SPD e a pastagem recuperam esses valores originais. O SPC também reduz os valores e o acúmulo de C-CO₂.

Os maiores valores de evolução e acúmulo de C-CO₂ estão associados aos sistemas com maiores quantidades de MOL e COT.

Palavras chave: sistema plantio direto, sistema de preparo convencional, estabilidade de agregados, gramíneas, evolução de C-CO₂.

Loss, Arcângelo; Elias Mendes Costa; Marcos Gervasio Pereira; Sidinei Julio Beutler (2014) Aggregation, light organic matter and carbon mineralization in soil aggregates. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (1): 1-8

The dynamics of soil aggregation, as well the levels of light organic matter (LOM), total organic carbon (TOC) and carbon mineralization potential are influenced by soil management systems. This study evaluated soil aggregation and quantify the levels LOM in water, TOC and mineralizable carbon (C-CO₂ evolution) in different land use systems in Marmeleiro, Paraná State, Brazil. We evaluated a no-tillage system (NTS), conventional tillage system (CTS), secondary forest and pasture (*Axonopus compressus*). Were collected soil samples deformed and undisturbed at 0-5 and 5-10 cm. We evaluated the mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), LOM, TOC and carbon mineralization (C-CO₂). The lowest values of MWD, GMD, LOM, TOC and C-CO₂ were found in the CTS. The NTS had higher MWD, GMD, TOC and accumulation of C-CO₂ that the area of forest (5-10 cm). The CTS reduces the aggregation indices (MWD and GMD) and LOM and TOC levels in relation to the area of forest, and the NTS and the pasture recover these original values. The CTS also reduces the values and accumulation of C-CO₂. The highest values of evolution and accumulation of C-CO₂ are associated with systems with larger amounts of LOM and TOC.

Key words: no-tillage system, conventional tillage system, aggregate stability, grasses, C-CO₂ evolution.

Recibido: 25/04/2013

Aceptado: 25/11/2013

Disponible on line: 01/04/2014

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUÇÃO

O homem interfere significativamente no fluxo global de carbono, sendo o sistema de preparo convencional do solo (SPC), através do uso de arados e grades, o grande responsável pelas perdas de carbono do solo, com ênfase no carbono que estava protegido nos agregados do solo (Machado, 2005; Jantalia et al., 2007; Loss et al., 2009; Fabrizzi et al., 2009; Pereira et al., 2010; Boddey et al., 2010; Costa Junior et al., 2011a,b). Para reverter essa situação, adota-se o sistema plantio direto (SPD), que, devido à ausência de revolvimento do solo e manutenção da palhada na superfície do solo, contribui para a melhoria da agregação do solo e consequentemente para o aumento dos estoques de carbono no solo, sendo mais eficaz quando associado à utilização de plantas de cobertura, seja por meio de rotação ou sucessão de culturas (Silva et al., 2009; Torres et al., 2011; Costa Junior et al., 2011a,b; Loss et al., 2012a).

A agregação do solo tem importante papel na proteção da matéria orgânica do solo (MOS), sendo que seu aumento é parcialmente determinado pelo vínculo entre a reciclagem de macroagregados, a formação de microagregados e a estabilização de carbono dentro dos microagregados (Six et al., 2000). Para a formação e posterior estabilização dos agregados, tem-se uma multiplicidade de interações entre os fatores: fauna do solo, microorganismos do solo, raízes, agentes inorgânicos e variáveis ambientais (Bronick & Lal, 2005; Six et al., 2004; Rilling & Mummey, 2006).

Dentre os fatores supracitados, elenca-se o sistema radicular, pois está diretamente relacionado à quantidade de C e de N nas diferentes classes de agregados do solo (Salton et al., 2008; Kasper et al., 2009). Uma forma de se verificar o efeito das raízes na agregação do solo é a quantificação da matéria orgânica leve (MOL) (Anderson & Ingram, 1989). A maior quantidade de raízes favorece a agregação do solo e também culmina em maiores valores de MOL, pois as raízes são matéria orgânica recente no solo (Loss et al., 2011a), que serão quantificadas como MOL.

A manutenção dos teores de MOL no solo torna-se fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, uma vez que ela representa, em curto e médio prazo, potencial para ciclagem de nutrientes (Compton & Boone, 2002; Ruivo et al., 2005; Loss et al., 2012b) e também pode propiciar equilíbrio nos sistemas agrícolas, pois influencia diretamente a atividade biológica, que atua na formação e estabilização dos agregados e funcionam como um bom indicador de qualidade do solo (Gupta & Germida 1988, Pereira et al., 2010; Angelini et al., 2012).

Associado à atividade biológica, tem-se a quantificação do compartimento lábil por meio da determinação do carbono mineralizável, que se origina da quebra das moléculas orgânicas pela degradação dos substratos incorporados ao solo, convertido em energia e biomassa pelo processo da respiração (Rosa et al., 2003). O carbono mineralizável é quantificado a partir da evolução de CO₂ (Mendonça & Matos, 2005), que reflete a atividade microbiana na decomposição da MOS (Bossuyt et al., 2002). A quantificação do C mineralizável (evolução de C-CO₂) tem sido utilizada para estudar os processos de ciclagem e transformação de nutrientes no solo (Maluche-Baretta et al., 2006).

A dinâmica da agregação do solo, assim como os teores de MOL, carbono orgânico total (COT) e de carbono potencialmente mineralizável são influenciados pelos sistemas de manejo do solo. Dessa forma, este trabalho teve como objetivos avaliar a agregação do solo e quantificar os teores de MOL em água, o COT e o C mineralizável (evolução de C-CO₂) em diferentes sistemas de uso do solo em Marmeleiro, Paraná, Brasil.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em uma propriedade rural, em Marmeleiro, localizada na região Sudoeste do Paraná (26° 14' S e 53° 10' W). O clima da região é o subtropical (Cfa segundo Koppen), apresentando estações bem definidas, com invernos amenos e verões quentes, sendo a precipitação bem distribuída ao longo do ano. O solo foi classificado como Nitossolo Vermelho (Rhodic Paleudalfs, conforme o Soil Survey Staff (2010)) apresentando textura argilosa (Embrapa, 2006).

Os sistemas avaliados consistiram de quatro áreas, sendo uma em sistema plantio direto (SPD) com 15 anos, uma área em sistema de preparo convencional (SPC) do solo, com 56 anos, uma área de floresta secundária e outra de pastagem extensiva (*Axonopus compressus*), ambas com mais de 30 anos. Antes, a área original era formada pela cobertura vegetal de Floresta Ombrófila Mista. Após a retirada da cobertura original, a área foi cultivada com soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) em SPC ± por 30 anos. Em seguida, a área passou a ser manejada na forma de SPD (últimos 15 anos), sendo utilizada a sucessão soja/azevém (*Lolium multiflorum*) (S 26° 14' 29,9" e W 53° 10' 18,4", 753 m). A área de SPC (S 26° 13' 32" e W 53° 11' 31", 740 m) é manejada com aração e gradagem há 56 anos, sendo cultivado sempre com milho. Nos últimos 14 anos, a área vem sendo cultivada com fumo (*Nicotiana tabacum*) (safrina normal) e na safrinha é feita a semeadura do milho. Após a colheita do milho, semeia-se aveia (*Avena strigosa*) para o pastejo de gado de leite no inverno. As áreas de floresta (S 26° 14' 30" e W 53° 10' 17", 747 m) e pastagem (S 26° 14' 57,6" e W 53° 10' 32,6", 713 m) adjacentes às áreas cultivadas foram tomadas como condição original do solo.

No momento da coleta das amostras, a área de SPD estava coberta com azevém e na área de SPC havia sido feita aração e gradagem recentemente. Por ocasião do cultivo da soja foi utilizado como adubação: 290 kg ha⁻¹ de N, P, K da fórmula 00:18:18 (semeadura). A cada 5 a 6 anos faz-se uma calagem na área de SPD, utilizando 1.240 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico. O azevém é semeado em março e permanece na área até outubro, quando se faz a semeadura da soja sobre a palhada dessecada do mesmo. Na área de SPC, utiliza-se 850 kg ha⁻¹ de N, P, K da fórmula 10:18:20 para o plantio do fumo, sendo 400 kg ha⁻¹ de uréia em cobertura.

As amostras de solo deformadas (avaliação da MOL) e indeformadas (avaliação da agregação) foram coletadas nas camadas de 0,0-5,0 e 5,0-10,0 cm, mediante abertura de quatro mini-trincheiras transversais às linhas de semeadura no SPD e no SPC. Na área de pastagem, evitou-se as áreas onde observou-se a ação do gado e, na área de floresta,

coletou-se no meio do fragmento localizado próximo as demais áreas. As amostras foram secadas ao ar e peneiradas a 2 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) para amostras deformadas e os agregados (peneiras de 8 e 4 mm) para amostras indeformadas, segundo Embrapa (1997).

Para avaliação da distribuição de agregados estáveis em água foi utilizado o método descrito em Embrapa (1997). Foram pesadas 25 g das amostras que ficaram retidas na peneira de 4 mm. Posteriormente as amostras foram transferidas para um jogo de peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm, umedecidas com pulverizador, sendo submetido à agitação vertical no aparelho de Yooder, durante 15 min. Após o tempo determinado, o material retido em cada peneira foi retirado, separado com o auxílio de jato de água, colocado em placas de petri e secado em estufa a 60°C, até que atingisse massa constante. Após a secagem, obteve-se a massa dos agregados retida em cada peneira. Com os dados de massa seca dos agregados foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados conforme Kemper & Chepil (1965).

O carbono orgânico total (COT) foi quantificado segundo Yeomans e Bremner (1988), onde foram pesadas 0,5 g das amostras de TFSA, macerada e passada pela peneira de 60 mesh. O material foi colocado em erlenmeyer de 250 mL, sendo em seguida, adicionados 5 mL de dicromato de potássio (0,167 mol.L⁻¹) e 7,5 mL de ácido sulfúrico. Posteriormente, aqueceu-se em bloco digestor à 170°C por 30 min. Em seguida, adicionou-se 80 mL de água destilada e 0,3 mL da solução indicadora (fenantrolina) para então titular com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,2 mol.L⁻¹.

Para a MOL foram pesadas 50 g de TFSA e acondicionadas em becker de 250 mL, adicionando-se 100 mL de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, deixando-se em repouso por uma noite. Decorrido o tempo, a suspensão foi agitada com bastão de vidro e todo o material passado por peneira de 0,25 mm, eliminando-se toda a fração argila e silte (Anderson & Ingram, 1989). Posteriormente, o material retido na peneira (MOL e areia) foi transferido, quantitativamente, novamente para o becker, completando-se o volume com água. Todo o material flotado foi passado por peneira de 0,25 mm, tomando-se cuidado para separar a MOL da fração areia. Em seguida, foi adicionada água ao becker, agitando-se manualmente para ressuspender a MOL restante e verter o material vagarosamente em peneira de 0,25 mm. Essa operação foi repetida até que todo o material que flutuou com a agitação em água foi removido. O material que ficou retido na peneira (MOL) foi transferido para recipientes de alumínio (previamente pesados), levado a estufa a 65 °C até atingir peso constante (72 horas), sendo pesado todo o conjunto.

Para a evolução do C-CO₂ (carbono potencialmente mineralizável), as amostras dos agregados, secas ao ar, foram reumedecidas (Gonçalves et al., 2002) por pulverização com água, duas vezes ao dia (manhã e noite) durante duas semanas. Em seguida foi determinada a capacidade de campo segundo o método do funil (Loss et al., 2013). Para tal, pesaram-se 30 g de agregados, colocando-as num funil de plástico com 10 cm de diâmetro, vedado com lã de vidro na base, para evitar a perda de material.

Posteriormente, os agregados foram saturados com água deionizada. Os funis foram cobertos com filme plástico para minimizar 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 secadas em estufa a 105 °C até obter-se massa constante. A capacidade de campo foi determinada utilizando a seguinte equação: $CC = P1 - P2 / P2$; onde, CC = capacidade de campo; P1 = peso da amostra de solo úmida (g); P2 = peso da amostra de solo seca (g).

Para a avaliação do C-CO₂ em laboratório, utilizou-se o método proposto por Mendonça & Matos (2005). Foram pesadas 50 g de agregados que ficaram acondicionados na peneira de 4,00 mm e colocados em recipientes de vidro de 500 cm³, com fechamento hermético, sendo a umidade do solo ajustada para 65 % da capacidade de campo previamente calculada. 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). Os recipientes de vidro (4 repetições por sistema de uso do solo) foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, sendo a temperatura ambiente (dentro do laboratório) mantida em 25 °C por meio de refrigeração. As coletas foram feitas em intervalos de 24 h nos primeiros 7 dias, de 48 h entre o 8° e o 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 o 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 %, e logo em seguida titulou-se com HCl 0,25 mol L⁻¹.

O cálculo do C-CO₂ evoluído é apresentado em mg de C-CO₂ 100 cm⁻³ de solo (agregados), durante o intervalo utilizado no monitoramento da amostra. A equação para obter este valor é: $C - CO_2 \text{ (mg)} = (B - V) \times M \times 6 \times (V1/V2)$; onde:

B = Volume de HCl gasto na titulação do branco; V = Volume de HCl gasto na titulação da amostra (mL); 6 = Massa atômica do carbono (12) dividido pelo número de mols de CO₂ que reagem com o NaOH (2); V1 = Volume total de NaOH usado na captura do CO₂; V2 = Volume de NaOH usado na titulação (mL).

Para a seleção das áreas de estudo foi considerada a homogeneidade nas características do solo, tais como o material de origem, a textura e classe de solo. Portanto, pode-se assumir que o meio atuou de forma uniforme nas unidades experimentais, de modo que os atributos do solo são facilmente identificáveis como homogêneos para receber os tratamentos. Dessa forma, o delineamento experimental empregado pode ser considerado como inteiramente casualizado (DIC), constando de quatro áreas (SPD, SPC, floresta e pastagem) (tratamentos) com quatro pseudorreplicações. Este tipo de avaliação se aplica, pois o DIC é considerado o delineamento mais simples dentro da estatística. Nesse delineamento, as unidades

experimentais se distribuem ao acaso, e o número de repetições pode ser igual ou diferente. Para sua aplicação, há necessidade apenas de que o meio atue de modo uniforme em todas as unidades experimentais e que estas sejam facilmente identificadas para receber o tratamento (Hurlbert, 1984; Costa Junior et al., 2011a).

Os resultados encontrados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados através dos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett, respectivamente. Não foi necessário utilizar transformação de dados. Posteriormente foi analisado como delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (SPD, SPC, floresta e pastagem) com 4 repetições cada um deles. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e os valores médios comparados entre si pelo teste LSD-student a 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação aos índices de estabilidade de agregados estáveis em água, diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), verificaram-se menores valores para a área de SPC do solo nas duas profundidades avaliadas. Entre as áreas de SPD, pastagem e floresta, na profundidade de 0-5 cm não foram encontradas diferenças entre as áreas. Todavia, na profundidade subsequente, a área de floresta secundária apresentou os menores índices de DMP e DMG quando comparada com as áreas de SPD e pastagem (Tabela 1).

Tabela 1. Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados, em mm, e matéria orgânica leve (MOL) e carbono orgânico total do solo (COT), em g kg⁻¹, nos diferentes sistemas de uso do solo em Marmeleiro, Paraná, Brasil. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre as áreas avaliadas pelo teste LSD-student a 5%. CV=coeficiente de variação.

Sistemas avaliados	Propriedades avaliadas / Profundidade			
	0-5 cm			
	DMP	DMG	MOL	COT
SPD	4,067 A	2,284 A	7,00 B	43,38 A
SPC	2,228 B	1,062 B	1,22 C	19,39 C
Pastagem	4,039 A	2,203 A	11,95 A	39,12 B
Floresta	4,034 A	2,209 A	6,80 B	38,02 B
C.V. (%)	6,32	7,27	8,02	3,21
	5-10 cm			
SPD	4,170 A	2,850 A	2,90 A	29,73 B
SPC	2,580 C	1,487 C	1,20 B	18,74 D
Pastagem	4,132 A	2,913 A	2,85 A	37,38 A
Floresta	3,934 B	2,445 B	2,70 A	27,53 C
C.V. (%)	4,09	6,98	8,45	3,70

Os valores de DMP e DMG semelhantes entre as áreas de SPD, pastagem e floresta (0,0-5,0 cm) são decorrentes dos altos teores de carbono orgânico (COT) encontrados nessas áreas (Tabela 1) e, também devido à ausência de revolvimento do solo nas mesmas quando comparadas a área de SPC. Dessa forma, há um acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo

com conseqüente aumento dos teores de MOS que juntamente com os altos teores de argila (Nitossolo Vermelho de textura argilosa) atuam como agentes cimentantes, aumentando a agregação do solo.

Para a profundidade de 5,0-10,0 cm, os maiores valores de DMP e DMG observados nas áreas de SPD e pastagem respeito da área com floresta secundária podem ser devidos aos maiores teores de COT (37,88; 29,73 e 27,52 g kg⁻¹, respectivamente para pastagem, SPD e floresta (Tabela 1) influenciados principalmente pelo sistema radicular bem desenvolvido das gramíneas (*Axonopus compressus*) na pastagem e azevem no SPD que exploram grandes profundidades, acarretando em maior aporte de matéria orgânica via rizo-deposição e morte de suas raízes, com posterior aumento da agregação do solo.

Resultados semelhantes a esses foram encontrados por Ferreira et al. (2007) avaliando a distribuição dos agregados do solo em áreas de pastagem, lavoura e floresta em solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Os autores encontraram maiores proporções de agregados estáveis em água na classe de 8 a 2 mm no uso com pastagem em relação ao uso de floresta. E, relataram que este padrão é decorrente da influência do sistema radicular desse tipo de cobertura vegetal, que por ser mais densa, melhor distribuída e por liberar grande quantidade de exsudatos no solo, beneficia as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e o contato entre os próprios agregados do solo, favorecendo a sua formação e estabilização no horizonte A (Bronick & Lal, 2005). Segundo Deneff et al. (2007), a entrada de resíduos vegetais estimula a reciclagem de agregados > 0,25 mm, os quais são importantes para a estabilização da MOS ao longo do tempo.

Em outro estudo sobre os índices de agregação do solo (DMP e DMG) em áreas com rotação de culturas em SPD (sem braquiária) e SPD associado à integração lavoura-pecuária (ILP), com o uso de braquiária na rotação, Loss et al. (2011a) encontraram maiores valores de DMP e DMG na área de ILP. Os autores concluíram que o uso da braquiária, por meio do sistema radicular, favoreceu a agregação do solo, culminando em maiores índices de DMP e DMG quando comparados a área sem o uso de braquiária.

Para a área de SPC, o uso de aração e gradagem promoveram a ruptura dos agregados do solo, principalmente os de maiores tamanhos (> 2 mm), culminando na redistribuição dos agregados para as peneiras de menor tamanho e, assim, menores índices de DMP e DMG. Além de quebrar os agregados do solo, no SPC tem-se a eliminação dos resíduos vegetais presentes na superfície do solo (menores valores de MOL; Tabela 1), sendo esses responsáveis pela reciclagem de agregados > 0,25 mm (Deneff et al., 2007).

A área de pastagem apresentou os maiores valores de MOL na profundidade de 0-5 cm, e a área de SPC, os menores valores nas duas profundidades avaliadas. Na área de SPC se observou homogeneidade dos teores de MOL nas duas profundidades, diferindo das demais áreas que apresentaram maiores proporções de MOL na profundidade de 0-5 cm, diminuindo na profundidade subsequente. Este padrão é devido ao revolvimento do solo e posterior incorporação do material depositado na superfície, ocasionando maior mineralização dos resíduos vegetais, com diminuição dos valores de MOL.

Os maiores teores de MOL na área de pastagem, SPD e floresta estão diretamente relacionados com os valores de DMP e DMG, concordando com os trabalhos de Portugal et al. (2010) e Loss et al. (2011a). E para a área de SPC, os menores teores de MOL acarretam em padrão contrário, com menores valores de DMP e DMG.

Os maiores teores de COT para 0,0-5,0 cm foram encontrados na área de SPD e os menores para a área de SPC, sendo nesta área verificados os menores teores de COT também para 5,0-10,0 cm (Tabela 1). No SPD, os maiores teores de COT são devidos ao uso de cobertura morta e da ausência de revolvimento do solo neste sistema. Estas práticas auxiliam na manutenção da umidade do solo e evitam o contato direto dos raios solares com o mesmo, diminuindo a temperatura na camada superficial do solo e, conseqüentemente, a mineralização da MOS (Loss et al., 2009). Padrão contrário a este foi verificado na área de SPC, confirmando o efeito negativo das práticas de manejo (aração e gradagem) em relação aos menores teores de COT encontrados nessa área. As áreas de floresta e pastagem não diferiram entre si para 0,0-5,0 cm. Entretanto, observou-se o efeito positivo do SPD em aumentar os teores de COT quando comparado com as áreas de floresta e pastagem (0,0-5,0 cm).

Nas áreas de SPD, pastagem e floresta (0,0-5,0 e 5,0-10,0) os maiores teores de COT quando comparados

com a área em SPC indicam a eficiência dessas áreas em acumular carbono no solo com o passar dos anos. Destaca-se que o aporte vegetal (serapilheira) na área de floresta e o uso de gramíneas na área de pastagem ou como planta de cobertura de inverno para o SPD, associado ao não revolvimento do solo e a permanência dos resíduos culturais na superfície favorecem aos maiores índices de agregação do solo (Tabela 1). Dessa forma tem-se a proteção do COT no interior dos agregados, promovendo o aumento da MOS (Conceição et al., 2005), o que não é favorecido no SPC (Loss et al., 2011b).

A área de SPD apresentou maiores valores de C-CO₂ (0-5 e 5-10 cm) logo após a incubação quando comparada às demais áreas (Figura 1). A atividade microbiana responde rapidamente a mudanças nas condições do solo após longos períodos de baixa atividade. Portanto, logo que se restabeleceu a umidade (re-umedecimento dos agregados) ocorreu aumento na respiração e mineralização do C e do N da MOS (Brookes, 1995). O maior pico de C-CO₂ liberado pela área de SPD pode ser devido aos maiores teores de COT (Tabela 1), advindos da decomposição da palhada do azevém e da soja, associado ao N proveniente da fixação biológica de nitrogênio (FBN) da soja. Desta forma, tem-se MOS mais prontamente disponível para a microbiota do solo.

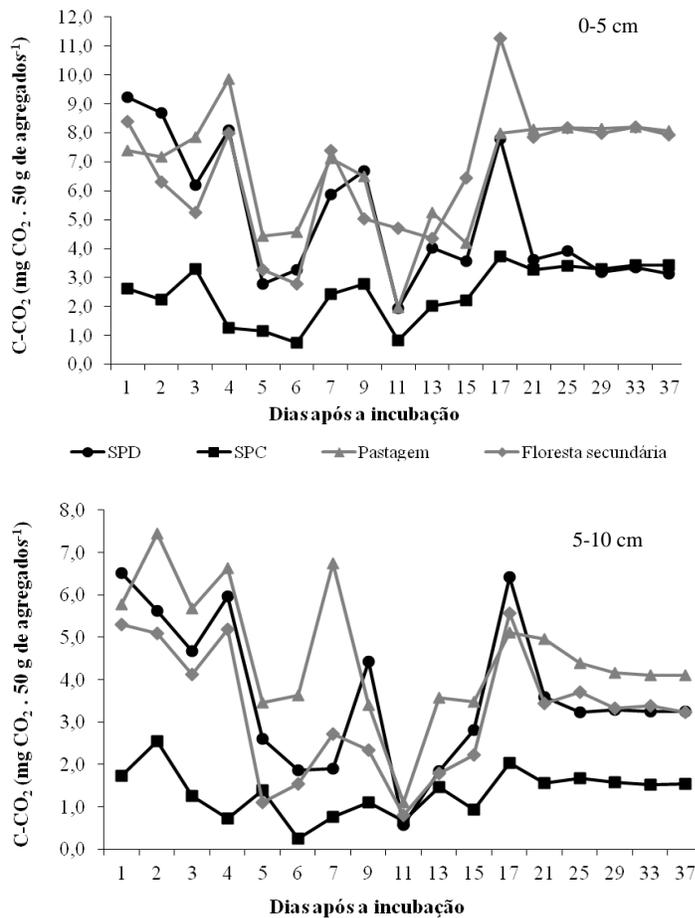


Figura 1. Evolução diária de C-CO₂ nas amostras de agregados (profundidade de 0-5 e 5-10 cm) incubados até os 37 dias de avaliação, nos diferentes sistemas de uso do solo em Marmeleiro, Paraná, Brasil.

A área de SPC apresentou os menores valores de C-CO₂ (0-5 e 5-10 cm) logo após a incubação quando comparada às demais áreas. E as áreas de pastagem e floresta apresentaram valores menores que o SPD e maiores que o SPC no 1º dia de incubação. O SPC do solo apresentou os menores valores de C-CO₂ (0-5 e 5-10 cm) em todos os períodos de avaliação (37 dias). Este padrão indica que o manejo desta área, com uso de aração e gradagem, ocasiona a quebra dos agregados do solo, com posterior aumento da mineralização da MOS, culminando em menores índices de agregação e menores valores de MOL e, conseqüentemente, menores valores de C-CO₂. Pode-se observar que a menor disponibilidade de frações lábeis (MOL) para a biota do solo no SPC (Tabela 1), acarreta em menores valores de C-CO₂ (Figura 1).

Observando-se a dinâmica da evolução do C-CO₂ no tempo de incubação, nos quatro sistemas avaliados, verifica-se uma alternância de picos de C-CO₂, com aumentos (4, 7, 13 e 17º dia) e diminuição dos picos (5, 11 e 21º dia) e, a partir do 25º dia ocorreu a estabilização da respiração microbiana. Estes resultados concordam com os determinados por Farias et al. (2005), avaliando a evolução do C-CO₂ de Latossolo Vermelho-Amarelo até 65 dias de incubação. Esses autores observaram que entre o 25º e 30º dias ocorreu a estabilização da atividade microbiana.

Os maiores picos de C-CO₂ verificados nos sistemas avaliados, por exemplo no 7º dia, podem ser decorrentes da morte de alguns microrganismos, pois a evolução de C-CO₂ foi gradativamente diminuindo do 4º até o 6º dia. Estes microrganismos possivelmente serviram de alimento para os microrganismos remanescentes (Gonçalves et al., 2002), originando os maiores picos de C-CO₂ oriundos da atividade microbiana. Este padrão se repete ao longo das avaliações, pois do 7º ao 11º dia verificou-se diminuição das emissões de C-CO₂, com posterior aumento do 13º para o 17º dia, até a estabilização das emissões de C-CO₂ a partir do 25º dia.

O maior acúmulo de C-CO₂ (maior atividade biológica) ocorreu na área de pastagem (0-5 e 5-10 cm), não diferindo da área de floresta na camada superficial do solo. A área de SPD apresentou maiores acúmulos de C-CO₂ quando comparada com a área de SPC, sendo nesta observados os menores acúmulos de C-CO₂ nas duas profundidades avaliadas (Tabela 2). No SPC observou-se uma redução de 50 e 64% do acúmulo de C-CO₂, respectivamente para 0-5 e 5-10 cm, em relação ao SPD. Estas diferenças são reflexo das práticas (aração e gradagem) inadequadas utilizadas no SPC. Dessa forma, pode-se inferir que há menor quantidade de carbono potencialmente mineralizável (C-CO₂) na área de SPC quando comparada com as demais áreas. Esse padrão pode ser observado na Tabela 1, onde se observa para a área de SPC menores valores de MOL e COT.

Nas áreas de floresta, pastagem e SPD, os maiores acúmulos de C-CO₂ estão diretamente relacionados aos maiores aportes de material vegetal e intensa ciclagem de raízes (principalmente gramíneas na pastagem e SPD) e ao não revolvimento do solo culminando em maiores valores de MOL e COT em detrimento ao SPC (Tabela 1). Esse padrão (maiores acúmulos de C-CO₂) irá acarretar maior ciclagem de carbono e nutrientes para as culturas comerciais

implantadas (D'Andréa et al., 2002). A maior disponibilidade de MOL favorece a atividade microbiana, acarretando em maiores acúmulos de carbono potencialmente mineralizável.

Tabela 2. Acúmulo de C-CO₂ (mg CO₂ 100g de agregados⁻¹) durante todo o período de incubação dos agregados do solo nos diferentes sistemas de uso do solo em Marmeleiro, Paraná, Brasil. Letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste t-LSD (p < 0,05). CV=coeficiente de variação.

Camada (cm)	Sistemas de uso do solo				CV(%)
	SPD	SPC	Pastagem	Floresta	
0,0-5,0	85,28 B	42,14 C	114,98 A	113,28 A	9,05
5,0-10,0	61,91 B	22,76 D	77,76 A	54,88 C	9,08

CONCLUSÕES

O SPC reduz os índices de agregação (DMP e DMG) e os teores de MOL e COT em relação à área de floresta e o SPD e pastagem recuperam esses valores originais. O SPC também reduz os valores e o acúmulo de C-CO₂. Os maiores valores de evolução e acúmulo de C-CO₂ estão associados aos sistemas com maiores quantidades de MOL e COT.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à Fundação Agrisus (Projeto PA 737/10), pela concessão de bolsa de Pós-doutorado ao primeiro autor e bolsa de iniciação científica ao segundo autor, respectivamente. Este trabalho faz parte do Pós-doutorado do primeiro autor apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

- Anderson, J.M. & J.S.I. Ingram.** 1989. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. CAB International. 171p.
- Angelini, G.A.R., A. Loss, M.G. Pereira, J.L.R. Torres, & O.J. Saggin Junior.** 2012. Colonização micorrízica, densidade de esporos e diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em solo de Cerrado sob plantio direto e convencional. *Semina. Ciências Agrárias* 33: 117-132.
- Boddey, R., C.P. Jantalia, P.C.E. Conceição, J.A. Zanatta, J. Mielniczuk, J. Dieckow, H.P. Santos, J.É. Denardin, S.J. Giacomini, S.C.S. Urquiaga & B.J.R. Alves.** 2010. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biology* 16: 784-795.
- Bossuyt, H., J. Six & P.F. Hendrix.** 2002. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using carbon-14 labeled plant residue. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1965-1973.

- Bronick, C.J. & R. Lal.** 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-32.
- Brookes, P.C.** 1995. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils* 19: 269-279.
- Compton, J.E. & R.D. Boone.** 2002. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 933-943.
- Conceição, P.C.; T.J. Amado, J. Mielniczuk & E. Spagnollo.** 2005. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29: 777-788.
- Costa Junior, C., M.C. Piccolo, M. Siqueira Neto, P.B. Camargo, C.C. Cerri & M. Bernoux.** 2011a. Carbono total e ^{13}C em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35: 1241-1252.
- Costa Junior, C., M. Siqueira Neto, M.C. Piccolo & P.B. Camargo.** 2011b. Nitrogênio e abundância natural de ^{15}N em agregados do solo sob diferentes usos da terra no Bioma Cerrado. *Ensaios e Ciência* 15: 47-66.
- D'Andréa, A.F., M.L.N. Silva, N. Curti, J.O. Siqueira & M.A.C. Carneiro.** 2002. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do Cerrado no sul do estado de Goiás. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 26: 913-923.
- Denef, K., L. Zotarelli, R.M. Boddey & J. Six.** 2007. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 1165-1172.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306 p.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de análise de solo. 2ª ed. Rio de Janeiro, 212p.
- Fabrizzi, K.P., C.W. Rice, T.J.C. Amado, J. Fiorin, P. Barbagelata & R. Melchiori.** 2009. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 92: 129-143.
- Farias, E.P., E. Zonta, G. Santos, G.A. Santos & L.P. Canellas.** 2005. Aporte de carbono solúvel pelo sistema radicular de arroz e sua influência nos teores de substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29: 875-882.
- Ferreira, F.P., A.C. Azevedo, R.C.D. Dalmolin & D. Girelli.** 2007. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul – Brasil. *Ciência Rural* 37: 381-388.
- Gonçalves, A.S., M.T. Monteiro, J.G.M. Guerra & H. DE-Polli.** 2002. Biomassa microbiana em amostras de solos secadas ao ar e reumedecidas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 651-658.
- Gupta, V.V.S.R. & J.J. Germida.** 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregation size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 20: 777-786.
- Hurlbert, S.H.** 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs* 54:187-211, 1984.
- Jantalia, C.P., D.V.S. Resck, B.J.R. Alves, L. Zotarelli, S.S.C. Urquiaga & R.M. Boddey.** 2007. Tillage effect on C stocks of a clayey oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Research* 95: 97-109.
- Kasper, M., G.D. Buchan, A. Mentler & W.E.H. Blum.** 2009. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil Tillage Research* 105: 192-199.
- Kemper, W.D. & W.S. Chapil.** 1965. Size distribution of aggregates. In: C.A.Black (ed) *Methods of soil analysis*. Part1. Madison, SSSA. p.495-509.
- Loss, A., M.G. Pereira, S.J. Beutler, A. Perin & L.H.C. Anjos.** 2013. Carbono mineralizável, carbono orgânico e nitrogênio em macroagregados de Latossolo sob diferentes sistemas de uso do solo no Cerrado Goiano. *Semina. Ciências Agrárias* 34: 2153-2168.
- Loss, A., M.G. Pereira, A. Perin & L.H.C. Anjos.** 2012a. Carbon and Nitrogen Content and Stock in No-Tillage and Crop-livestock Integration Systems in the Cerrado of Goiás State, Brazil. *Journal of Agricultural Science* 4: 96-105.
- Loss, A., M.G. Pereira, A. Perin, S.J. Beutler & L.H.C. Anjos.** 2012b. Carbon, nitrogen and natural abundance of ^{13}C e ^{15}N of light-fraction organic matter under no-tillage and crop-livestock integration systems. *Acta Scientiarum. Agronomy* 34: 484-487.
- Loss, A., M.G. Pereira, L.H.C. Anjos, S.G. Giacomo & A. Perin.** 2011a. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 46: 1269-1276.
- Loss, A., M.G. Pereira, L.H.C. Anjos, S.J. Beutler, E.P. Ferreira & E.M.R. Silva.** 2011b. Oxidizable organic carbon fractions and soil aggregation in areas under different organic production systems in Rio de Janeiro, Brazil. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14: 699-708.
- Loss, A., M.G. Pereira, N. Schultz, E.P. Ferreira, E.M.R. Silva & S.J. Beutler.** 2009. Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. *Acta Scientiarum. Agronomy* 31: 523-528.
- Machado, P.L.A.O.** 2005. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova* 28: 329-334.
- Maluche-Baretta, C.R.D., C.V.T. Amarante & O. Klauberg-Filho.** 2006. Análise multivariada de atributos do solo em sistemas convencional e orgânico de produção de maçãs. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41: 1531-1539.
- Mendonça, E.S. & E.S. Matos.** 2005. *Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises*. 1ª ed. Ponte Nova: D&M Gráfica e Editora Ltda, 107p.
- Pereira, M.G., A. Loss, S.J. Beutler & J.L.R. Torres.** 2010. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em áreas de Cerrado sob plantio direto, MG. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 45: 508-514.
- Portugal, A.F., I. Juncksh, C.E.R.G. Schaefer & J.C.L. Neves.** 2010. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos comparado com mata. *Revista Ceres*, 57: 545-553.
- Rilling, M.C. & D.L. Mummey.** 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171: 41-53.
- Rosa, M.E.C., N. Olszewski, E.S. Mendonça, L.M.**

Costa & J.R. Correia. 2003. Formas de carbono em Latossolo Vermelho Eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27: 911-923.

Ruivo, M.L.P., I.G. Amaral, M.P.S. Faro, E.L.C. Ribeiro, A.L.S. Guedes & M.M.L.S. Santos 2005. Caracterização química da manta orgânica e da matéria orgânica leve em diferentes tipos de solo de uma topossequência na Ilha de Algodal/ Maiandeuá, PA. *Boletim do Museo Paraense Emílio Goeldi* 1: 227-234.

Salton, J.C., J. Mielniczuk, C. Bayer, M. Boeni, P.C. Conceição, A.C. Fabrício, M.C.M. Macedo & D.L. Broch. 2008. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32:11-21.

Silva, A.A., L. Galon, F.A. Ferreira, S.P. Tironi, E.A. Ferreira, A.F. Silva, I. Aspiazú & E.L. Agnes. 2009. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. *Revista Ceres* 56: 496-506.

Six, J., H. Bossuyt, S. Gryze & K. Denef. 2004. A

history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Research* 79: 7-31.

Six, J., E.T. Elliott & K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Biology and Biogeochemistry* 32: 2099-2103.

Soil Survey Staff. 2010. Keys to soil taxonomy. 11 ed. USDA- Natural Resource Conservation Service. Washington, D.C.; USA.

Torres, J.L., A.J. Fabian & M.G. Pereira. 2011. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Ciência e Agrotecnologia* 35: 437-445.

Yeomans, J.C. & J.M. Bremner. 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 1467-1476.