

Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquidos de suínos e cultivado em plantio direto

Maria Sueli Heberle Mafra⁽¹⁾, Paulo Cezar Cassol⁽¹⁾, Jackson Adriano Albuquerque⁽¹⁾, Juliano Corulli Correa⁽²⁾, Marco André Grohskopf⁽¹⁾ e Jonas Panisson⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade do Estado de Santa Catarina, Avenida Luiz de Camões, nº2.090, CEP 88520-000 Lages, SC, Brasil. E-mail: mshmafra@gmail.com, a2pc@cav.udesc.br, albuquerque@pq.cnpq.br, marcogrohskopf@gmail.com, panisson.jonas@gmail.com ⁽²⁾Embrapa Suínos e Aves, BR 153, Km 110, Vila Tamanduá, Caixa Postal 21, CEP 89700-000 Concórdia, SC, Brasil. E-mail: juliano.correa@embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi estimar taxas de acúmulo de C orgânico em Latossolo Vermelho adubado com adubo solúvel e dejetos líquidos de suíno e cultivado em plantio direto. O experimento foi conduzido em Campos Novos, SC, e os seguintes tratamentos foram aplicados anualmente: sem adubação; adubo solúvel; 25 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos + adubo solúvel; e doses de 25, 50, 100 e 200 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos. Foram determinados: os estoques de C orgânico (CO) na camada de 0–20 cm do solo; a adição de C pela fitomassa dos cultivos e pelo dejetos líquidos de suíno; as taxas anuais de fixação de C; e os coeficientes de humificação (k₁) e de mineralização (k₂) de CO do solo. As taxas de fixação de C real e aparente aumentaram de acordo com as doses de dejetos, tendo variado de 0,6 a 1,7 e de 0,05 a 1,0 Mg ha⁻¹ por ano, respectivamente. Os coeficientes k₁ e k₂ foram 0,17 e 0,011, respectivamente, enquanto o aporte de C requerido para manter o estoque inicial de CO do solo é de 4,14 Mg ha⁻¹ por ano. O dejetos líquidos de suíno aplicado anualmente em Latossolo Vermelho cultivado com a sucessão milho-aveia-preta em plantio direto aumenta o CO do solo em doses de até 200 m³ ha⁻¹.

Termos para indexação: adubo orgânico, fixação de carbono, matéria orgânica, sistema conservacionista, suinocultura.

Carbon storage on an Oxisol fertilized with pig slurry and cropped under no-tillage

Abstract – The objective of this work was to estimate organic C storage rates in a Typic Hapludox fertilized with soluble fertilizer and pig slurry and cropped under no-tillage. The experiment was carried out in the municipality of Campos Novos, in the state of Santa Catarina, Brazil, and the following treatments were applied annually: no fertilization; soluble fertilizer; 25 m³ ha⁻¹ pig slurry + soluble fertilizer; and rates of 25, 50, 100, and 200 m³ ha⁻¹ pig slurry. The following were determined: organic carbon (OC) stocks in the 0–20 cm soil layer; C inputs by crop biomass and pig slurry; annual C fixation rates; and the soil OC humification (k₁) and mineralization (k₂) coefficients. The real and apparent C fixation rates increased according to pig slurry rates, ranging from 0.6 to 1.7 and from 0.05 to 1.0 Mg ha⁻¹ per year, respectively. The k₁ and k₂ coefficients were 0.17 and 0.011, respectively, whereas the C input required to maintain the initial stock of OC is of 4.14 Mg ha⁻¹ per year. Pig slurry applied annually on a Typic Hapludox cropped with the maize-black oat succession under no-tillage increases soil OC in rates of up to 200 m³ ha⁻¹.

Index terms: organic fertilizer, carbon fixation, organic matter, conservation system, swine production.

Introdução

A matéria orgânica do solo (MOS) participa em diversos processos biológicos, químicos e físicos do solo, determinantes do seu potencial produtivo. Portanto, a diminuição na MOS prejudica alguns desses processos e diminui a produtividade das culturas (Ferreira et al., 2012), o que torna necessário propor sistemas de manejo e de adubação do solo que preservem ou aumentem o teor de MOS.

A perda no estoque de C orgânico do solo tem sido atribuída ao preparo intensivo, ao aumento da erosão, ao cultivo de espécies com baixo aporte de resíduos e à acelerada decomposição microbiana, com aumento das emissões de CO₂ (Bayer et al., 2006; Tivet et al., 2013; Wei et al., 2014). O aumento de C orgânico no solo é considerado alternativa viável para mitigar as emissões de CO₂ na agricultura em curto prazo (Magrin et al., 2007), e pode ocorrer pelo incremento do influxo de

C e pela redução das taxas de decomposição da MOS nos agroecossistemas. Para isso, devem ser utilizadas práticas conservacionistas, como plantio direto e manejo adequado dos resíduos culturais.

O aumento do teor de C orgânico do solo pode ser efetivado em sistemas conservacionistas de produção (Lal, 2010), que incluem o cultivo de plantas de cobertura (Diekow et al., 2005) e a aplicação de resíduos orgânicos, como dejetos de suínos (Scherer et al., 2010). O dejetos líquidos de suíno resulta da mistura de fezes, urina, restos de rações, pelos e descamação de animais, e, principalmente, de água de lavagem das baias, a qual geralmente confere alta diluição ao material. Esse resíduo contém matéria orgânica, além de nutrientes, como N e P, e especialmente micronutrientes, o que pode melhorar propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e aumentar a produtividade das culturas (Cassol et al., 2012; Sá et al., 2014). O uso do resíduo como fertilizante é amplo nas regiões com produção intensiva de suínos (Scherer et al., 2010; Cassol et al., 2012). O dejetos líquidos de suíno aplicado ao solo nem sempre aumenta a MOS (Scherer et al., 2010); contudo, o aumento da produção de biomassa em sistemas de plantio direto, nos quais os resíduos orgânicos são empregados na fertilização do solo, pode promover o incremento da MOS em médio e longo prazo (Karhu et al., 2012).

As taxas de acúmulo e perda de C orgânico são determinadas pelas condições de clima, pelas características mineralógicas e pelo sistema de manejo do solo (McCarthy et al., 2008; Lal, 2010; Sá et al., 2014), com destaque para a quantidade de matéria orgânica introduzida no sistema (West & Post, 2002). Entre os modelos matemáticos que avaliam a dinâmica da MOS, sobressaem-se os que permitem a estimativa de taxas de fixação de C orgânico no solo e a variação do estoque desse compartimento ao longo do tempo (Karhu et al., 2012). O modelo unicompartmental proposto por Hénin & Dupuis (1945) e adotado por Bayer et al. (2006) é baseado no balanço anual de entradas e saídas de C orgânico no solo, sem levar em conta a cinética intra-anual. Esse modelo possibilita a estimativa dos coeficientes de humificação dos resíduos adicionados (k_1) e de mineralização da MOS (k_2), bem como a adição mínima de C requerida para manter os estoques originais de C orgânico do solo. Por esse modelo, a variação anual do estoque de C orgânico do solo resulta da diferença entre as quantidades de C adicionadas (k_1A) e perdas (k_2C), as quais variam de

acordo com o tipo de solo, as culturas e os sistemas de manejo utilizados.

O objetivo deste trabalho foi estimar taxas de acúmulo de C orgânico em Latossolo Vermelho adubado com adubo solúvel e dejetos líquidos de suíno e cultivado em plantio direto.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido em campo, no Município de Campos Novos, SC (51°21'47"W, 27°23'34"S, a 863 m de altitude média). O clima é do tipo Cfb, conforme Köppen, mesotérmico úmido, com verão ameno e com médias anuais de precipitação e temperatura de 1.480 mm e 16°C, respectivamente. O solo do local é originado de basalto e classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, com teores de argila, na camada de 0–20 cm, entre 664 e 701 g kg⁻¹; aproximadamente 120 g kg⁻¹ de óxidos de ferro (hematita e goethita) (Almeida et al., 2003); e 25 g kg⁻¹ de C orgânico na implantação do experimento.

A partir de outubro de 2001, os seguintes tratamentos foram aplicados uma vez ao ano: sem adubação; adubação solúvel (AS); doses de dejetos líquidos de suíno (DLS) de 25 (DLS25), 50 (DLS50), 100 (DLS100) e 200 (DLS200) m³ ha⁻¹; e 25 m³ ha⁻¹ de DLS complementado com AS (DLS+AS). Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições em parcelas de 12x6,3 m.

O DLS empregado proveio de animais em terminação e recria, e foi recolhido em fluxo contínuo e estocado em esterqueira a céu aberto por cerca de quatro meses. A composição química do DLS (Tabela 1) foi determinada conforme Tedesco et al. (1995). As doses anuais de N, P₂O₅ e K₂O aplicadas nos diversos tratamentos estão especificadas na Tabela 2. No tratamento AS, foram empregadas as fontes ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, que também compuseram a parte solúvel do tratamento DLS+AS. Nesse tratamento, as doses foram ajustadas anualmente de modo que a soma dos três nutrientes fornecidos por esses adubos e pelo DLS fossem semelhantes às fornecidas pelo tratamento AS. Tanto o DLS quanto os adubos solúveis foram distribuídos a lanço na superfície do solo, sempre em outubro de cada ano.

Anualmente, cultivou-se a sucessão milho (*Zea mays* L.) e aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) em sistema plantio direto. A adição de C pelas culturas foi estimada ao se multiplicar a fitomassa pelo teor médio

de C orgânico, de 434 e 470 g kg⁻¹, determinado segundo Tedesco et al. (1995), nos resíduos culturais de milho e aveia-preta, respectivamente. A fitomassa aérea do milho foi estimada com base no rendimento de grãos, obtido por Cassol et al. (2012), tendo-se considerado o índice médio de colheita de 0,50, calculado em todos os tratamentos, em duas safras do experimento. A fitomassa de aveia-preta foi determinada em sete safras, e, a partir do valor médio observado em cada tratamento, estimou-se o total de fitomassa acumulada no período de avaliação. A contribuição do sistema radicular na adição de C no solo foi estimada em 30% do C fornecido pela fitomassa aérea das culturas, com base nos resultados obtidos por Bolinder et al. (1999) e Lovato et al. (2004). O C orgânico contido no DLS foi determinado anualmente, e o total adicionado nas diversas aplicações está descrito na Tabela 2.

A primeira amostragem de solo foi realizada em outubro de 2001, antes da aplicação dos tratamentos, tendo-se coletado, com trado holandês, uma amostra composta de 20 subamostras da camada de 0–20 cm do solo da área de cada bloco. Em seguida, o solo foi amostrado em outubro de 2010 e abril de 2012, com intervalo de 17 meses entre as duas amostragens. Coletou-se, em cada parcela, com trado calador, sete subamostras, nas camadas de: 0–2,5, 2,5–5, 5–10 e 10–20 cm. Amostras com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0–5, 5–10 e 10–20 cm, para determinar a densidade do solo. O C orgânico foi determinado pelo método Walkley-Black, conforme

Tabela 1. Características químicas de dejetos líquidos de suíno aplicados anualmente em experimento de campo, no período de 2001 a 2011, em Latossolo Vermelho distroférrico.

Período	pH	N	K	P	Ca	Mg	COT ⁽¹⁾
------(kg m ⁻³)-----							
Outubro/2001	6,70	3,40	1,20	1,40	3,30	1,10	19,20
Novembro/2002	7,10	2,60	1,20	1,00	1,80	0,70	13,20
Outubro/2003	6,90	2,60	1,30	1,10	2,10	0,90	17,80
Outubro/2004	7,30	3,70	1,50	1,40	2,80	0,50	16,60
Outubro/2005	7,80	3,20	1,10	1,50	1,80	0,90	17,40
Outubro/2006	7,00	4,60	1,70	2,80	1,70	0,90	33,60
Outubro/2007	7,30	2,70	1,10	1,80	1,50	0,80	19,70
Outubro/2008	7,10	2,40	2,30	0,40	0,90	0,50	23,90
Outubro/2009	7,20	6,60	2,00	1,10	1,60	0,50	21,60
Outubro/2010	7,40	3,90	1,70	1,30	1,40	0,60	33,40
Outubro/2011	7,20	3,50	1,80	1,50	2,30	1,00	27,50
Média	7,18	3,56	1,54	1,39	1,93	0,76	22,17
Desvio-padrão	0,29	1,21	0,40	0,59	0,67	0,22	6,76

⁽¹⁾COT, carbono orgânico total.

descrito por Tedesco et al. (1995), e o estoque no solo foi estimado para a camada equivalente e por meio da equação de Veldkamp (1994): EstC = (CO x Ds x e)/10, em que EstC é o estoque de C orgânico em determinada camada do solo (Mg ha⁻¹); CO é o teor de C orgânico total na camada amostrada (g kg⁻¹); Ds é a densidade do solo da camada (kg dm⁻³); e e é a espessura da camada considerada (cm).

A taxa de fixação de CO real (TFCr) foi determinada com base na variação do estoque anual de C em cada tratamento, a partir do início do experimento, por meio da equação: TFCr = (Ctf - Ct0)/(Δt), em que Ctf e Ct0 são os estoques de C orgânico dos tratamentos no ano final (média de 2010 e 2012) e inicial, respectivamente; Δt é o tempo das avaliações do início ao final. A média dos teores de C em 2010 e 2012 foi utilizada para diminuir o efeito das épocas de coleta do solo, em outubro e abril, respectivamente.

A taxa de fixação de C orgânico aparente (TFCa) foi determinada com base na diferença entre o estoque de C orgânico existente no tratamento com adubação solúvel (AS) e os demais tratamentos, por meio da equação: TFCa = (Ctr - CAS)/Δt, em que Ctr são os estoques de C orgânico dos tratamentos sem adubação, DLS+AS, DLS25, DLS50, DLS100 e DLS200; e CAS é o estoque de C orgânico no tratamento AS; e Δt é o tempo das avaliações do início ao final. Para contornar o provável efeito da variação sazonal no estoque de C orgânico entre épocas de coleta durante o ano, as taxas

Tabela 2. Quantidades anuais de macronutrientes e C após aplicações anuais de adubo solúvel, dejetos líquidos de suíno e dejetos associados a adubo solúvel, na sucessão milho (*Zea mays*) e aveia-preta (*Avena strigosa*), em plantio direto, em Latossolo Vermelho distroférrico.

Tratamento ⁽¹⁾	C	N	P	K	Ca	Mg
------(kg ha ⁻¹ por ano)-----						
AS até 2007	0	130	100	70	0	0
AS de 2007 a 2012	0	170	130	80	0	0
DLS+AS até 2007	550	130	100	70	50	20,0
DLS+AS de 2007 a 2012	550	170	130	80	50	20,0
Sem adubação	0	0	0	0	0	0
DLS25	550	90	35,5	37,5	50	20,0
DLS50	1.100	180	71,0	75	100	40,1
DLS100	2.200	360	142	150	200	80,1
DLS200	4.400	720	284	300	400	160,2

⁽¹⁾AS, adubo solúvel; DLS, dejetos líquidos de suíno; DLS25, 25 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS50, 50 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS100, 100 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS200, 200 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno.

de fixação de C reais (TFCr) e aparentes (TFCa) foram calculadas com base no estoque médio de C orgânico determinado nas duas épocas. Isso diluiu possíveis erros originados de efeitos da época de amostragem, com a obtenção de dados mais robustos do que se fossem provenientes de apenas uma época.

Os coeficientes de humificação (k_1) e de perda de C orgânico por mineralização (k_2) foram estimados a partir de equação linear ajustada entre a quantidade de C adicionado (A) e o estoque médio de C orgânico no solo (C_t), em 2010 e 2012, de acordo com o modelo de Hénin & Dupuis (1945), representado pela seguinte equação: $C_t = C_0 e^{-k_2 t} + k_1 A k_2 (1 - e^{-k_2 t})$, em que C_t é o estoque de C orgânico após um determinado tempo t; C_0 é o estoque de C orgânico inicial (tempo $t=0$); k_2 é a taxa de perda de C orgânico por mineralização, erosão e lixiviação; k_1 é o coeficiente de humificação, que corresponde à fração do C adicionado que é incorporado ao estoque de C orgânico do solo; e A é a adição anual de C orgânico ao solo.

A primeira derivada da equação do modelo de Hénin & Dupuis (1945) é expressa por: $dC/dt = -k_2 C + k_1 A$, em que a razão dC/dt é a taxa anual de variação do estoque de C orgânico do solo ($Mg\ ha^{-1}$ por ano); A é a massa ($Mg\ ha^{-1}$ por ano) de C orgânico adicionada anualmente ao solo na forma de fertilizantes orgânicos, resíduos vegetais, raízes e exsudatos radiculares; e C é o estoque de C orgânico no solo ($Mg\ ha^{-1}$). Quando os valores de C incorporado e de C perdido são iguais, não há variação no estoque de C orgânico; assim, $dC/dt = 0$, o que indica que o estoque de CO encontra-se em equilíbrio (C_e). Nesse caso, o modelo pode ser representado por: $C_t = a + bA$, em que a constante a corresponde ao termo $C_0 e^{-k_2 t}$ da equação do estoque médio de C no solo e representa o estoque de C orgânico numa situação em que a adição de C seja nula ($A=0$); e o termo bA , quando o estoque de C orgânico encontra-se em equilíbrio, corresponde ao termo $k_1 A k_2 (1 - e^{-k_2 t})$ da equação do estoque médio de C no solo e representa o estoque de C orgânico no tempo t que resultou da adição (A) de C pelos resíduos de plantas e de outros materiais orgânicos no solo, no decurso desse tempo. Com isso, foram calculados os coeficientes k_2 e k_1 : $k_2 = (\ln C_0 - \ln a) / t$; $k_1 = k_2 b / (1 - e^{-k_2 t})$.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias de cada tratamento foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. A variável TFCa foi comparada pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade, para comparação

dos tratamentos com o controle (tratamento AS). Para tanto, utilizou-se o programa estatístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EUA). A análise de regressão foi empregada para relacionar o efeito das doses de DLS sobre o estoque de C orgânico do solo.

Resultados e Discussão

O C adicionado pela fitomassa das culturas nos tratamentos variou de 3,9 a 11,8 $Mg\ ha^{-1}$ por ano (Tabela 3). Esses valores foram semelhantes ao observado por Lovato et al. (2004), que estimaram adição em torno de 8 $Mg\ ha^{-1}$ por ano de C a partir da fitomassa de milho e de culturas de cobertura cultivadas em plantio direto, em Argissolo Vermelho, no Rio Grande do Sul. O tratamento sem adubação apresentou a menor adição de C pela fitomassa, o que pode ser atribuído à ausência de adubação e à consequente redução da fertilidade do solo, principalmente em razão da exportação de nutrientes por meio da colheita do milho. Os tratamentos com doses de DLS apresentaram adições crescentes de C ao solo, de acordo com a dose. Contudo, não houve variação entre os tratamentos DLS25, DLS50, DLS+AS e AS. Já DLS100 e DLS200 adicionaram 56 e 66% a mais de C pela fitomassa, respectivamente, do que a AS. No entanto, a dose máxima de aplicação de dejetos de suíno, estabelecida pela legislação ambiental de Santa Catarina, é de 50 $m^3\ ha^{-1}$ por ano.

O tratamento DLS50 que compreendeu doses de N, P e K semelhantes às da AS proporcionou C de fitomassa 38% superior ao do tratamento controle. Esses resultados são indicativos de que o efeito do dejetos de suíno não se resume ao suprimento dos três nutrientes da adubação tradicional. Isso porque esse dejetos tem efeitos positivos adicionais aos do adubo solúvel, como a diminuição da disponibilidade de Al e o aumento de Ca (Cassol et al., 2012) e de outros nutrientes (Zhang et al., 2006), especialmente micronutrientes e outras substâncias estimulantes que podem favorecer a produtividade das culturas (Annicchiarico et al., 2011).

Os estoques de C orgânico na camada de 0–20 cm, na amostragem feita em abril de 2012, não aumentaram em relação aos observados em outubro de 2010 (Tabela 4). A ausência de ganhos de C orgânico no período de 17 meses, entre as duas amostragens, pode ser explicada pela diferença nas épocas de amostragem. Em outubro de 2010, as amostras foram coletadas sete dias após a dessecação da cultura de aveia-preta, enquanto, em

abril de 2012, isso ocorreu logo depois da colheita do milho realizada. Segundo Campos et al. (2011), nessa época, o solo apresenta menor temperatura e maior umidade que no verão. Portanto, a taxa de mineralização do C orgânico do solo pode ser menor no período que antecede à primeira amostragem, o que favorece seu acúmulo em relação à segunda. Entretanto, como a aveia-preta estava em pleno vigor vegetativo quando foi dessecada, por ocasião da amostragem, havia raízes parcialmente decompostas e seu conteúdo de C foi recuperado na análise, o que também pode ter contribuído para aumentar os teores de C orgânico especificamente nesse estágio. A variação no estoque de C orgânico entre épocas de coleta durante o ano também foi observada por Campos et al. (2011) e foi relacionada à maior presença de resíduos de raízes das culturas e à ocorrência de períodos com maior umidade do solo, os quais conferiram maior estoque do que a média.

A TFCr aumentou com as doses de dejetos, tendo variado de -0,21 a 1,69 Mg ha⁻¹ por ano, e a menor taxa foi verificada no tratamento sem adubação que diminuiu o C orgânico em relação ao estoque inicial de 65 Mg ha⁻¹ (Tabela 4). Isso evidencia que a adição de C ao solo pela fitomassa, na ausência de fertilização, foi insuficiente para compensar a perda de C decorrente, principalmente, da mineralização microbiana da MOS (Zhang et al., 2006). O DLS em doses a partir de 25 m³ ha⁻¹ resultou em TFCr positiva, com destaque para o tratamento DLS25 que promoveu

incremento anual de C no solo de 0,64 Mg ha⁻¹ por ano, valor semelhante ao obtido no tratamento AS, cuja TFCr foi de 0,72 Mg ha⁻¹ por ano. Esses resultados estão de acordo com os obtidos em estudos anteriores realizados nas condições edafoclimáticas do Sul do Brasil, por Ferreira et al. (2012) e Sá et al. (2014), que encontraram sequestro de C orgânico no solo de cerca de 0,8 Mg ha⁻¹ por ano, em áreas de Latossolos manejadas em plantio direto. Contudo, West & Post (2002), Franzluebbers (2010) e Olson et al. (2014) observaram incremento de C orgânico no solo após a transição de cultivo convencional para sistema plantio direto, da ordem de 0,50 Mg ha⁻¹ por ano.

As TFCr dos tratamentos DLS100 e DLS200 superaram em 130 e 140% a TFCr do tratamento AS, respectivamente (Tabela 4). Isso pode ser resultante do maior aporte de C orgânico proporcionado tanto pela fitomassa das culturas quanto pela adição de dejetos nos tratamentos com altas dosagens desse resíduo (Tabela 3).

As TFCa estimadas para cada tratamento foram significativas quando comparadas ao tratamento AS, com exceção da obtida no tratamento DLS25, de 0,08 Mg ha⁻¹ por ano. No tratamento sem adubação, a TFCa foi 0,93 Mg ha⁻¹ por ano menor que a do tratamento AS (Tabela 4). Essa diferença pode ser explicada pelo maior aporte de C no solo pela fitomassa das culturas, por meio da adubação com fertilizante solúvel em sistema plantio direto. A TFCa do tratamento DLS25 foi de -0,05 Mg ha⁻¹ por ano e mostra que a aplicação

Tabela 3. Média anual de fitomassa seca (FS) produzida e de carbono (C) adicionado pela parte aérea (PA) e pelas raízes das culturas de milho (*Zea mays*) e aveia-preta (*Avena strigosa*), após 11 anos de aplicações anuais de dejetos líquidos de suíno, adubo solúvel e dejetos associados a adubo solúvel, na sucessão milho-aveia-preta, em plantio direto, em Latossolo Vermelho distroférrico⁽¹⁾.

Tratamento ⁽²⁾	Milho		Aveia-preta		Raízes ⁽³⁾ C	Total de FS C	DLS		Total C
	FS PA	C PA	FS PA	C PA			MS	C	
	------(Mg ha ⁻¹ por ano)-----								
AS	7,24ab	3,12ab	3,84d	1,81d	2,2abc	7,12b	0e	0e	7,12d
DLS+AS	8,87a	3,81a	5,87c	2,66c	2,83cd	9,30ab	1,5d	0,55d	9,85cd
Sem adubação	3,95b	1,7b	2,28e	1,04e	1,21d	3,95c	0e	0e	3,94e
DLS25	7,24ab	3,11ab	4,17d	2,19d	2,31bcd	7,62b	1,5d	0,55d	8,17cd
DLS50	8,87a	3,82a	6,35bc	3,06bc	2,95abc	9,82ab	3,0c	1,10c	10,92bc
DLS100	9,73a	4,18a	7,70ab	3,62ab	3,31ab	11,12a	6,0b	2,20b	13,32ab
DLS200	10,11a	4,34a	8,39a	3,93a	3,49a	11,77a	12,0a	4,40a	16,17a

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾AS, adubo solúvel; DLS, dejetos líquidos de suíno; DLS25, 25 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS50, 50 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS100, 100 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS200, 200 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno. ⁽³⁾Valores estimados conforme proposto por Bolinder et al. (1999): 0,3 x C da fitomassa aérea (MS de palha e grão de milho + MS de aveia-preta).

de dejetos líquidos, mesmo quando realizada em doses que forneceram N, P e K em quantidades menores que as aplicadas pelos fertilizantes solúveis, apresenta capacidade de acumular C semelhante à do sistema convencional de adubação.

Os tratamentos DLS50, DLS+AS, DLS100 e DLS200 apresentaram TFCas positivas e crescentes, o que evidencia que a adubação com 25 m³ ha⁻¹ por ano de DLS complementada com AS, bem como com doses a partir de 50 m³ ha⁻¹ por ano proporcionaram estoques de C orgânico no solo maiores do que o da adubação com fertilizante solúvel. A diferença nas taxas de fixação aparente foi relacionada à maior adição de C proporcionada pela fitomassa das culturas e pelo DLS (Tabela 3). Assim, a utilização de DLS em culturas anuais, associada às práticas de manejo apropriadas, além de possibilitar o aproveitamento dos nutrientes do resíduo produzido pela atividade suinícola – o que pode diminuir a necessidade de compra de fertilizantes comerciais –, também contribui para o aumento da MOS.

Ao se considerar a média dos estoques determinados aos 9 e 11 anos de aplicações de todos os tratamentos que receberam exclusivamente dejetos, nas doses de 0

a 200 m³ ha⁻¹ por ano, o estoque de C orgânico (C_t) na camada de 0–20 cm do solo aumentou linearmente em função da adição anual (A) de C (R²=0,82) (Figura 1). O aumento linear do estoque de C do solo em função da adição de C orgânico também foi observado por Diekow et al. (2005), para adições anuais de até cerca de 14 Mg ha⁻¹ de C. A variação linear indica que a adição de C ao solo não atinge o valor necessário para saturação do seu potencial de acumular MOS. Essa condição é compatível com o modelo cinético de primeira ordem proposto por Hénin & Dupuis (1945) e empregado por Bayer et al. (2006), que descreve relação constante entre o estoque de CO no solo e a adição de C por resíduos vegetais e fertilizantes orgânicos, com o passar do tempo.

O coeficiente de mineralização (k₂), estimado com base nos estoques dos tratamentos, foi de 0,011 por ano. Esse coeficiente foi semelhante ao relatado por Clay et al. (2012), que obtiveram k₂ de 0,011 em Chernossolo sob cultivo contínuo de milho em plantio direto, e inferior ao observado por Lovato et al. (2004), que obtiveram k₂ de 0,017 por ano após 13 anos de cultivos de milho em plantio direto; porém, esse coeficiente pode variar com as condições edafoclimáticas.

Tabela 4. Taxas de fixação de C orgânico real (TFCr) e aparente (TFCa) no nono (2010) e no décimo primeiro (2012) ano, em Latossolo Vermelho cultivado com a sucessão milho (*Zea mays*) e aveia-preta (*Avena strigosa*), em plantio direto, e submetido a aplicações anuais de adubo solúvel, adubo solúvel combinado a dejetos líquidos de suíno e doses crescentes de dejetos líquidos de suíno⁽¹⁾.

Tratamento ⁽²⁾	Estoque de C orgânico			Média (2010/12)	TFCr	TFCa ⁽³⁾
	2001	2010	2012			
	------(Mg ha ⁻¹)-----				-----(g ha ⁻¹ por ano)----	
AS	65,0	69,3b	73,8ab	71,6b	0,72b	-
DLS+AS	65,0	74,7ab	79,8b	77,3ab	1,18ab	0,46±0,26*
Sem adubação	65,0	64,9c	60,7c	62,8c	-0,21c	-0,93±0,12*
DLS25	65,0	74,6ab	68,3bc	71,5b	0,64b	-0,05±0,20 ^{ns}
DLS50	65,0	77,3ab	76,2ab	76,8ab	1,17ab	0,45±0,18*
DLS100	65,0	81,7a	80,2a	81,0a	1,59a	0,88±0,29*
DLS200	65,0	82,8a	81a	81,9a	1,69a	0,98±0,25*
CV (%)	-	4,9	3,1	3,2	0,55	-

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾AS, adubo solúvel; DLS, dejetos líquidos de suíno; DLS25, 25 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS50, 50 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS100, 100 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno; DLS200, 200 m³ ha⁻¹ de dejetos líquidos de suíno. ^{ns}Não significativo. *Significativo pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade. O valor após o símbolo ± representa o erro-padrão da média (n=4).

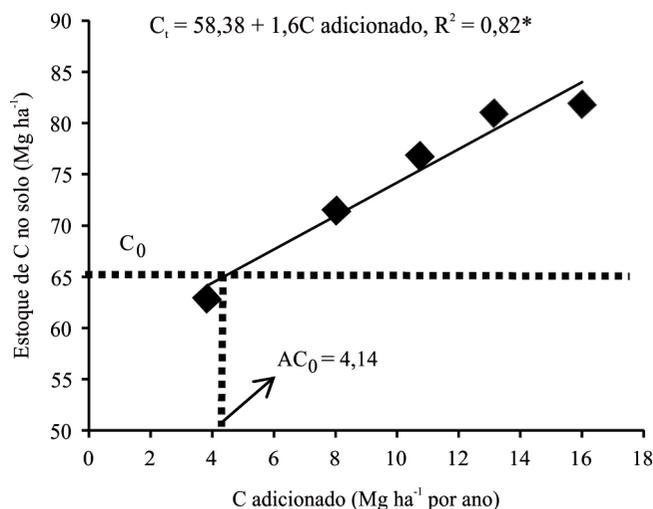


Figura 1. Relação entre a quantidade de C adicionado e o estoque médio de C orgânico no solo (C_t), em 2010 e 2012, na camada de 0–20 cm, em Latossolo Vermelho distroférrico submetido a aplicações anuais de doses de dejetos líquidos de suíno e cultivado em sistema plantio direto. AC₀, adição anual necessária de C para manter o estoque de C orgânico inicial (C₀).

Bayer et al. (2006), em clima subtropical, estimaram coeficientes k_2 de 0,040 e 0,019 na camada de 0–17 cm de Argissolo em preparo convencional e plantio direto, respectivamente. Coeficientes k_2 mais baixos geralmente são observados em solos manejados em sistema plantio direto, em comparação ao plantio convencional, e resultam da maior proteção física da MOS no interior dos agregados que são mantidos e que apresentam maior estabilidade naquele sistema. Isso é resultado da ausência de revolvimento e da menor exposição do solo às chuvas (McCarthy et al., 2008), sobretudo em Latossolo que apresenta teores de argila e óxidos de ferro altos, como é o caso do solo avaliado no presente trabalho.

As perdas de C por erosão no período experimental foram consideradas insignificantes, em razão da baixa declividade do terreno (<2%) e da manutenção permanente do solo com cobertura. Dessa forma, o coeficiente k_2 estimado pode ser considerado como sendo a taxa de mineralização do C orgânico do solo.

O coeficiente de humificação (k_1) estimado foi de 0,17. Esse resultado foi semelhante ao obtido por Bayer et al. (2006), que encontraram k_1 de 0,15 na camada de 0–17 cm de Argissolo cultivado com sistemas de culturas, como o milho, em plantio direto, em condições de clima subtropical. No entanto, o coeficiente de humificação é considerado baixo quando comparado aos obtidos por Allmaras et al. (2004), que relataram k_1 de 0,26 para resíduos de milho em sistema plantio direto, e por Nicoloso (2009), que registrou k_1 de 0,24 e 0,26, em sistemas de plantio convencional e plantio direto, respectivamente. A taxa de humificação obtida no presente trabalho foi menor do que as observadas pelo último autor, uma vez que foi estimada com base no C orgânico da camada de 0–20 cm e não da camada de 0–5 cm (Nicoloso, 2009), que é mais diretamente afetada pela contribuição do C proveniente da fitomassa das culturas. Nesse sentido, observou-se que o k_2 é mais influenciado pelas características de clima, solo e sistema de cultivo, enquanto o k_1 é afetado principalmente pelas características do C adicionado e do tempo em que é aplicado.

Com base na equação linear ajustada entre o estoque de C orgânico (Ct) e a adição anual (A), conclui-se que 4,14 Mg ha⁻¹ por ano de C orgânico (A_{C₀}) devem ser adicionadas pelos cultivos anuais para manter o estoque existente no solo, no início do experimento (C₀ = 65 Mg ha⁻¹), situação em que não

haveria variação desse estoque em função do tempo (dC/dt=0) (Figura 1). Essa adição anual requerida para manter o nível inicial de C orgânico é compatível com os resultados de outros estudos, como os de Lovato et al. (2004) e Bayer et al. (2006), que relataram necessidade de adição de 4,2 e 3,9 Mg ha⁻¹ por ano de C, respectivamente, pelos cultivos anuais para manter os estoques iniciais de C orgânico total em Argissolo Vermelho distrófico manejado em plantio direto, em clima subtropical do Sul do Brasil.

Conclusões

1. O dejetos líquido de suíno aplicado como fertilizante em cultivos sucessivos de milho e aveia-preta, em plantio direto, em doses a partir de 50 m³ ha⁻¹ por ano, aumenta a taxa de fixação de carbono no solo comparativamente à adubação normalmente recomendada com N, P e K de fontes solúveis.

2. Com base no incremento dos estoques de C orgânico, em função da quantidade de C total adicionado pelo dejetos líquido de suíno e pela fitomassa dos cultivos sucessivos de milho e aveia-preta, em Latossolo em plantio direto, as taxas de humificação e mineralização de C no solo são de aproximadamente 17 e 1,1%, respectivamente.

3. O cultivo de milho e aveia-preta em Latossolo Vermelho sem adubação diminui o estoque de C orgânico, pois não adiciona a quantidade mínima de C necessária para manter o estoque inicial de 4,1 Mg ha⁻¹ por ano, para esse solo.

Agradecimentos

Ao produtor rural Celso Retore, pela disponibilização da área experimental; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa.

Referências

- ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; CLAPP, C.E. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, tillage, and stover management. *Soil Science Society of America Journal*, v.68, p.1366-1375, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.1366.
- ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfato em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, v.27, p.985-1002, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000600003.

- ANNICCHIARICO, G.; CATERNOLO, G.; ROSSI, E.; MARTINIELLO, P. Effect of manure vs. fertilizer inputs on productivity of forage crop models. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.8, p.1893-1913, 2011. DOI: 10.3390/ijerph8061893.
- BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A.; MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, v.91, p.217-226, 2006. DOI: 10.1016/j.still.2005.12.006.
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GIROUX, M.; LAVERDIERE, M.R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, v.215, p.85-91, 1999. DOI: 10.1023/A:1004765024519.
- CAMPOS, L.P.; LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; IWATA, B. de F.; NÓBREGA, J.C.A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1681-1689, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001200014.
- CASSOL, P.C.; COSTA, A.C. da; CIPRANDI, O.; PANDOLFO, C.M.; ERNANI, P.R. Disponibilidade de macronutrientes e rendimento de milho em Latossolo fertilizado com dejetos suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1911-1923, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000600025.
- CLAY, D.E.; CHANG, J.; CLAY, S.A.; STONE, J.; GELDERMAN, R.H.; CARLSON, G.C.; REITSMA, K.; JONES, M.; JANSSEN, L.; SCHUMACHER, T. Corn yields and no-tillage affects carbon sequestration and carbon footprints. **Agronomy Journal**, v.104, p.763-770, 2012. DOI: 10.2134/agronj2011.0353.
- DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v.81, p.87-95, 2005. DOI: 10.1016/j.still.2004.05.003.
- FERREIRA, A. de O.; SÁ, J.C. de M.; HARMS, M.G.; MIARA, S.; BRIEDIS, C.; QUADROS NETTO, C.; SANTOS, J.B. dos; CANALLI, L.B. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1583-1590, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000500022.
- FRANZLUEBBERS, A.J. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern United States. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, p.347-357, 2010. DOI: 10.2136/sssaj2009.0079.
- HÉNIN, S.; DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. **Annales Agronomiques**, v.15, p.17-19, 1945.
- KARHU, K.; GÄRDENÄS, A.I.; HEIKKINEN, J.; VANHALA, P.; TUOMI, M.; LISKI, J. Impacts of organic amendments on carbon stocks of an agricultural soil – comparison of model-simulations to measurements. **Geoderma**, v.189-190, p.606-616, 2012. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.06.007.
- LAL, R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. **BioScience**, v.60, p.708-721, 2010. DOI: 10.1525/bio.2010.60.9.8.
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, C. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.175-187, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000100017.
- MAGRIN, G.; GAY GARCÍA, C.; CRUZ CHOQUE, D.; GIMÉNEZ, J.C.; MORENO, A.R.; NAGY, G.J.; NOBRE, C.; VILLAMIZAR, A. Latin America. In: PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VAN DER LINDEN, P.J.; HANSON, C.E. (Ed.). **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University, 2007. p.581-615.
- MCCARTHY, J.F.; ILAVSKY, J.; JASTROW, J.D.; MAYER, L.M.; PERFECT, E.; ZHUANG, J. Protection of organic carbon in soil microaggregates via restructuring of aggregate porosity and filling pores with accumulating organic matter. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.72, p.4724-4744, 2008. DOI: 10.1016/j.gca.2008.06.015.
- NICOLOSO, R. da S. **Estoques e mecanismo de estabilização do carbono orgânico do solo em agroecossistemas de clima temperado e sub-tropical**. 2009. 108p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- OLSON, K.R.; AL-KAISI, M.M.; LAL, R.; LOWERY, B. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. **Soil Science Society of America Journal**, v.78, p.348-360, 2014. DOI: 10.2136/sssaj2013.09.0412.
- SÁ, J.C.M. de; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D.C.; SANTOS, J.Z.; SANTOS, J.B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.136, p.38-50, 2014. DOI: 10.1016/j.still.2013.09.010.
- SCHERER, E.E.; NESI, C.N.; MASSOTTI, Z. Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1375-1383, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000400034.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J.; **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 215p.
- TIVET, F.; SÁ, J.C. de M.; LAL, R.; BORSZOWSKI, P.R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J.B. dos; SÁ, M.F.M.; HARTMAN, D. da C.; EURICH, G.; FARIAS, A.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, v.209-210, p.214-225, 2013. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.06.008.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x.
- WEI, X.; SHAO, M.; GALE, W.; LI, L. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. **Scientific Reports**, v.4, article number 4062, 2014. DOI: 10.1038/srep04062.

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**, v.66, p.1930-1946, 2002. DOI: 10.2136/sssaj2002.1930.

ZHANG, M.; GAVLAK, R.; MITCHELL, A.; SPARROW, S. Solid and liquid cattle manure application in a subarctic soil. **Agronomy Journal**, v.98, p.1551-1558, 2006. DOI: 10.2134/agronj2006.0045.

Recebido em 19 de fevereiro de 2014 e aprovado em 11 de agosto de 2014