

Solo

SPD recupera matéria orgânica no agrossistema

João Carlos de Moraes Sá*

PRISCILA OLIVEIRA



A expressiva expansão do Sistema Plantio Direto (SPD) nos últimos dez anos transformou a produção de palhada num desafio para lavouras de diversas regiões climáticas do Brasil. A área estimada do SPD é de 25,5 milhões de hectares (Febrapdp, 2008) e a taxa de expansão anual, com base nos dados do período de 1992 a 2004 (Febrapdp, 2004), foi de 1,94 milhões de hectares. Isso indica que o produtor está procurando se desenvolver utilizando sistemas de manejo do solo que minimizem seus riscos. O desafio atual é ajustar a necessidade de produção da palhada a um benefício que aumente a rentabilidade do produtor e dê sustentação aos sistemas de produção de alimentos.

Entretanto, o tempo de recuperação do potencial produtivo do solo, após vários anos sob preparo convencional (PC), com a adoção do SPD, está estreitamente relacionado ao nível de degradação de seus atributos físicos, químicos e biológicos, que tem consequências diretas no balanço de carbono (C) (Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001, Amado et al., 2006). Apresentamos aqui os resultados de experimentos de longa duração acerca da dinâmica da matéria orgânica em solos sob SPD.

Consórcio de milho, braquiária e crotalária; Ipameri, GO

PROCESSOS DE ACÚMULO

O não revolvimento do solo, associado à adição e à manutenção de resíduos culturais na superfície, promove a decomposição lenta e gradual dos resíduos, o que resulta na liberação de compostos orgânicos que estimulam a formação de novos agregados (Tisdall; Oades, 1982; Six et al., 2002). O manejo do solo no SPD integra o reservatório ativo e o estável da matéria orgânica do solo (MOS). As raízes das culturas, associadas às hifas de fungos e aos exsudados das raízes (rizodepósitos), possuem papel fundamental na reorganização das partículas primárias e microagregados, dispersos pela ação do preparo para a formação de macroagregados estáveis (Figura 1). Do ponto de vista do manejo do solo, a sugestão de Duxbury et al. (1989), alocando os diferentes estágios da dinâmica do C em quatro compartimentos ou reservatórios, representa as seguintes possíveis alterações causadas pelo manejo:

- **Reservatório ativo ou lábil** – é constituído por compostos orgânicos facilmente oxidáveis, derivados de fragmentos de vegetais recentes, pela biomassa microbiana, e de rizodepósitos. É controlado principalmente pela adição de resíduos culturais e pelo clima e é fortemente afetado pelo tipo de manejo do solo. As modificações são rápidas, com elevadas quantidades de C e de nitrogênio (N), em função das transformações da biomassa microbiana.
- **Reservatório lentamente oxidável** – está relacionado com os macroagregados e é controlado pela mineralogia e pelos fatores agronômicos que interferem na agregação. Entre esses fatores, os sistemas de manejo do solo afetam o tamanho e o diâmetro médio dos agregados e o conteúdo de C nesse reservatório.
- **Reservatório muito lentamente oxidável** – está relacionado com os microagregados e o fator controlador é a estabilidade do agregado em água.

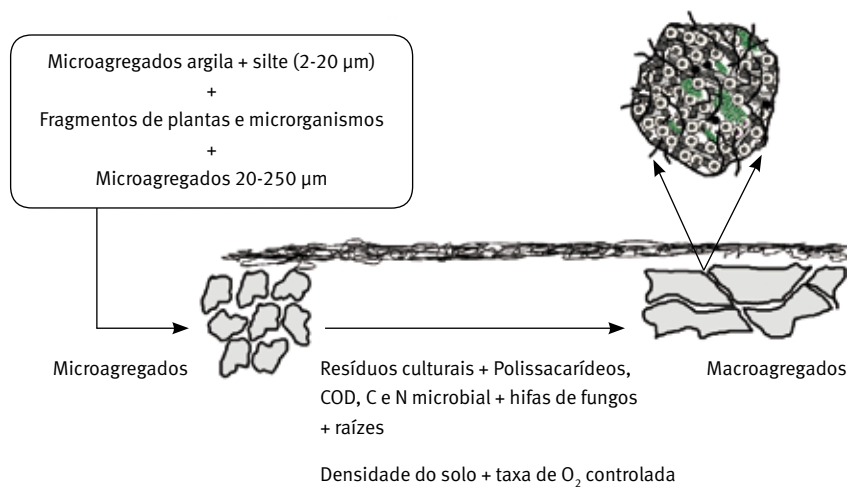
O sistema de manejo do solo tem pequeno impacto nesse compartimento.

- **Reservatório passivo ou recalci-trante** – está relacionado com o C associado às partículas primárias do solo. É controlado pela mineralogia da fração argila, formando complexos organo-argílicos, pela decomposição microbiana que reduz o C para formas elementares. Os sistemas de manejo do solo não influenciam esse compartimento.

No SPD, o processo de agregação é contínuo e responde diretamente à quantidade e à qualidade do material orgânico

(raiz e palhada) adicionado. O modelo hierárquico para agregação, proposto por Tisdall; Oades (1982), tem sido utilizado como referência em vários estudos sobre a compartimentalização da MOS (Figura 2). O tipo de resíduo cultural adicionado no plantio direto possui elevada quantidade de celulose e menor quantidade de ligninas e, em consequência, a velocidade de decomposição e a taxa de humificação são alteradas. No sistema sob vegetação natural, a diversidade de espécies com maior entrada de compostos orgânicos – constituídos de ceras, gorduras, ligninas e polifenóis – resulta num fluxo de C

FIGURA 1 | SEQUÊNCIA DE AGREGAÇÃO NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO (SPD)



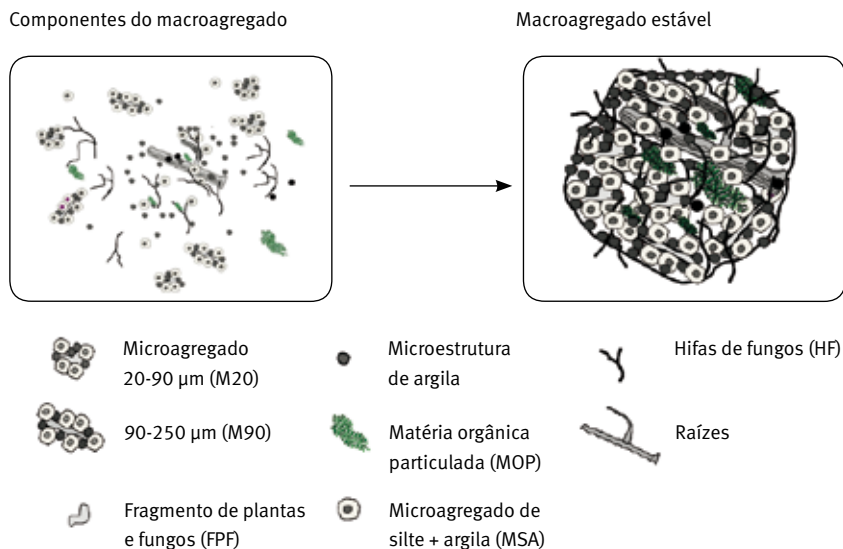
Adaptado de Sá, J. C. M., 2009

TABELA 1 | VELOCIDADE DE DECOMPOSIÇÃO DOS COMPOSTOS ORGÂNICOS ORIUNDOS DOS RESÍDUOS VEGETAIS

CONSTITUINTES ORGÂNICOS	VELOCIDADE DE DECOMPOSIÇÃO
Açúcares, amido e proteínas simples	Rápida
Proteínas interestratificadas em polissacarídeos	
Hemicelulose	↓
Celulose	
Gorduras e ceras	
Polifenóis e ligninas	
	Lenta

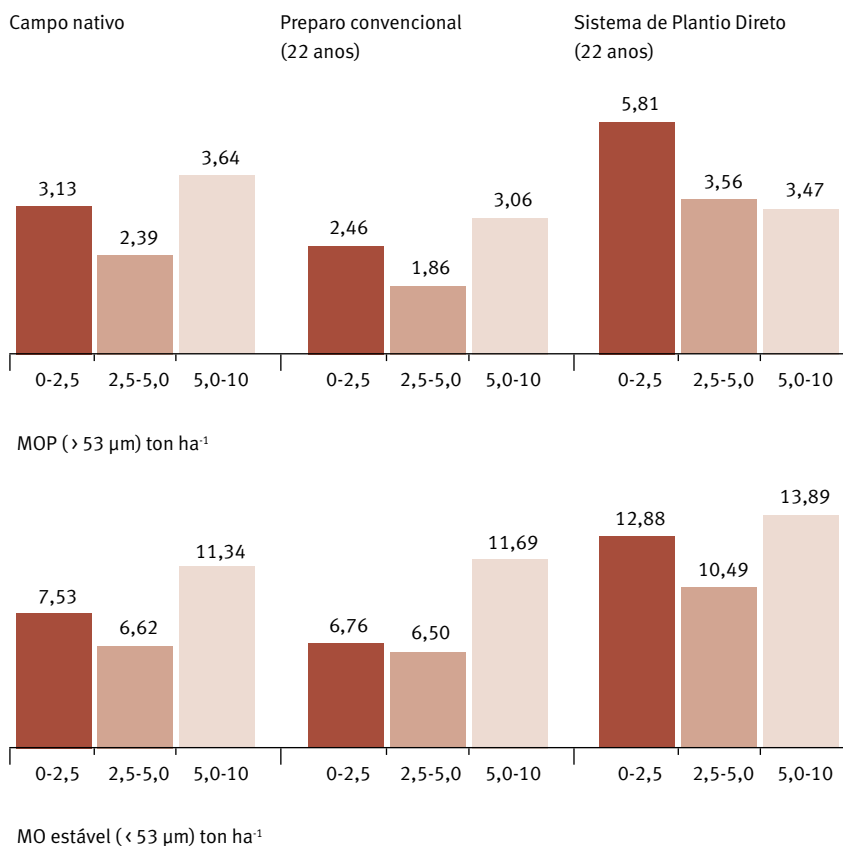
Fonte: Elaborada pelo autor, 2009

FIGURA 2 | COMPARAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DA MATÉRIA ORGÂNICA EM TRÊS SISTEMAS DE USO DA TERRA: CAMPO NATIVO (VEGETAÇÃO NATURAL E SOLO NÃO PERTURBADO); PREPARO CONVENCIONAL E SPD; HÁ 22 ANOS EM CULTIVO



Fonte: Adaptado do modelo de Tisdal; Oades 1982

FIGURA 3 | COMPONENTES DO MACROAGREGADO



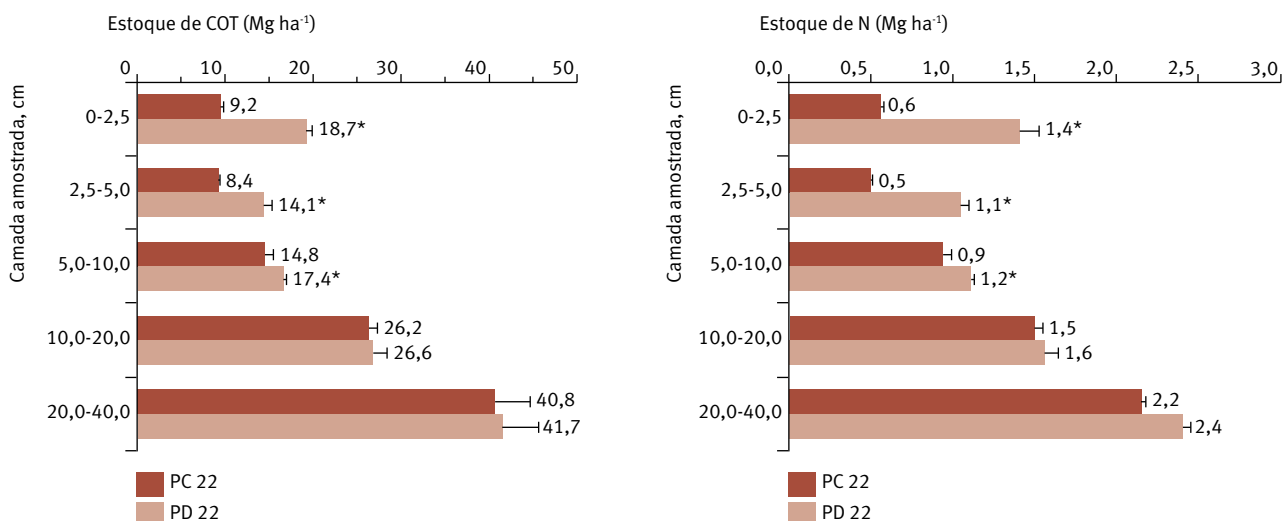
Fonte: Adaptado de Sá, J. C. M., 2009

mais lento. A sequência e a velocidade de decomposição dos compostos orgânicos, provenientes dos resíduos culturais, possuem cinética de transformação, de acordo com a constituição de cada grupo de compostos orgânicos (Tabela I).

No SPD, as entradas de compostos orgânicos com predominância de compostos celulósicos são mais intensas, devido ao tipo de rotação de culturas adotado pelo produtor. Essa “injeção” de celulose altera a diversidade dos agentes decompositores, estimulando a ocorrência, em maior expressão, de microrganismos celulolíticos. Além disso, a decomposição lenta e gradual restabelece o fluxo contínuo de C, proporcionando a redistribuição de compostos orgânicos com diferentes estágios de humificação nos compartimentos da MOS (Figura 3). O aporte contínuo de resíduos na superfície do solo, que proporciona manutenção da cobertura do solo durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, resulta em recuperação da MOS nos diversos compartimentos (Figura 3). O plantio direto contínuo, por 22 anos, recuperou a matéria orgânica perdida com a ação do preparo convencional, até o compartimento estável. Isso indica que a estratégia para a sustentabilidade do SPD está na capacidade de manter o solo coberto, proporcionando o fluxo contínuo de compostos para a estabilização ao longo do tempo.

Inúmeros resultados de pesquisas, na região Sul (Bayer et al., 2000 e 2001; Sá et al., 2001; Sisti et al., 2004; Diekow et al., 2004; Amado et al., 2002 e 2006) ou em áreas tropicais (Resck et al., 1998; Corazza et al., 1999; Bayer et al., 2006; Corbeles et al., 2006; Cerri et al., 2007), têm mostrado maior acúmulo de C no SPD, quando comparado ao PC. Entretanto, as maiores taxas de acúmulo de C estão estreitamente relacionadas a sistemas de produção com aportes de C superiores a 4,5 t ha⁻¹ ano⁻¹. Em contraste, sistemas que mantêm a sucessão contínua de cultivos, no inverno e no verão, são ineficientes

FIGURA 4 | ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT) E NITROGÊNIO TOTAL (N), EM LATOSSOLO VERMELHO ARGILOSO, HÁ 22 ANOS SOB SPD (PD 22), E PLANTIO CONVENCIONAL (PC 22), EM CINCO CAMADAS AMOSTRADAS*



*Os números ao lado da barra representam o estoque em cada camada amostrada; os números nas barras representam o desvio padrão em relação à média e os asteriscos ao lado dos números indicam a diferença significativa entre as médias do estoque do PD 22 e PC 22, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade

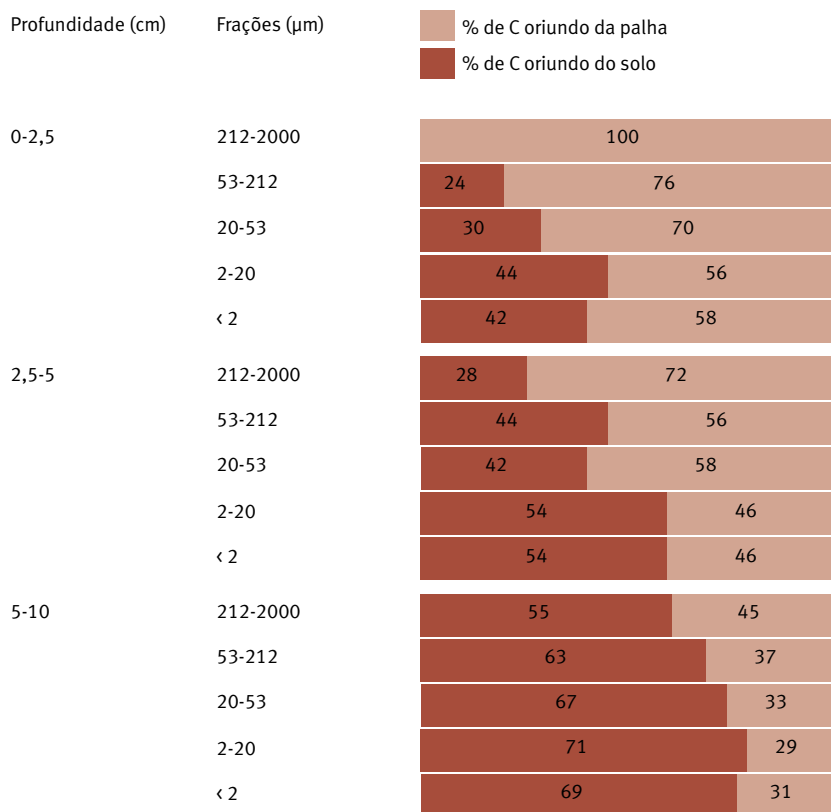
Fonte: Sá et. al., 2001

TABELA 2 | CONCENTRAÇÃO DE C (g kg⁻¹) E ESTOQUE DE CARBONO (Mg ha⁻¹), NAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, NA CAMADA ATÉ 10 CM, NO SPD HÁ 22 ANOS (SPD-22) E NO PREPARO CONVENCIONAL HÁ 22 ANOS (PC-22); REGIÃO DE CAMPOS GERAIS, PR

CAMADA AMOSTRADA (cm)	FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS (µm)	SISTEMA DE MANEJO DO SOLO			
		SPD-22		PC-22	
		----- g kg ⁻¹ -----		----- Mg ha ⁻¹ -----	
0 – 2,5	210-2000	39,3 A	16,0 B	4,77 A	1,69 B
	53-210	46,2 A	32,1 B	2,10 A	1,26 B
	20-53	72,1 A	48,0 B	2,08 A	1,40 B
	2-20	56,5 A	39,5 B	1,76 A	1,48 B
	0-2	61,0 A	44,5 B	5,93 A	4,24 B
2,5 – 5,0	210-2000	17,0 A	9,1 B	1,61 A	0,76 B
	53-210	37,4 A	28,4 B	1,84 A	1,31 B
	20-53	57,7 A	43,3 B	1,60 A	1,23 B
	2-20	49,4 A	45,5 B	1,55 B	2,59 A
	0-2	53,0 A	42,0 B	5,41 A	3,53 B
5,0 – 10,0	210-2000	7,5 A	7,4 A	1,52 A	1,16 B
	53-210	24,5 A	26,4 A	2,82 A	2,32 B
	20-53	40,5 A	42,7 A	2,41 A	2,42 A
	2-20	42,6 A	44,1 A	3,94 A	4,48 A
	0-2	45,0 A	42,3 A	10,05 A	7,02 B

Adaptado de Sá, J. C. M., 2009

FIGURA 5 | PORCENTAGEM DE CARBONO ORIUNDO DE RESÍDUOS CULTURAIS E CONVERTIDO EM CARBONO ORGÂNICO DO SOLO (EM CINZA) E C ORIGINAL DO SOLO (EM PRETO), EM LATOSSOLO VERMELHO, SOB SPD HÁ 22 ANOS*



*Os números nas barras horizontais representam a porcentagem de contribuição dos resíduos e do solo

Fonte: Sá et. al., 2001

e não acumulam C, apresentando valores iguais ou até inferiores ao PC (Sisti et al., 2004). A Figura 4 ilustra a diferença entre o SPD e o PC, na região dos Campos Gerais, no acúmulo de C e N, após 22 anos de comparação.

A maior contribuição no estoque de carbono orgânico total (COT) e de N no SPD, em comparação ao solo sob PC, ocorreu na camada de 0 – 10 cm e representou 81,8% e 98,9% de todo o aumento do estoque. A perda de C no solo sob preparo convencional, comparado ao SPD, também ocorreu na camada de 0 – 10 cm de profundidade e representou 97% da perda total (Sá et al., 2001). O constante fraturamento

dos macroagregados, provocado pelo preparo do solo, deixa de existir ou fica restrito à linha de semeadura. Em consequência, a entrada repentina de O₂ é sensivelmente reduzida, criando um ambiente menos oxidativo. Assim, a exposição da MOS ao ataque microbiano é minimizada e permite que os agentes de agregação atuem como ligantes na formação de macroagregados. A ausência de revolvimento do solo, associada a diferentes tipos, qualidade e quantidade de sistemas radiculares, permite a formação de uma arquitetura com poros contínuos, induzindo a ocorrência de um fluxo dirigido dos gases. Desse modo, a abordagem de Reicosky et al. (1995) su-

gere a existência de uma taxa controlada de O₂ e CO₂ nesses poros, que influencia a atividade da biomassa microbiana.


A adição contínua de resíduos culturais, com relações C/N contrastantes, proporciona fluxos diferenciados de C e N. A Figura 4 respalda esses argumentos. Dessa forma, haverá períodos com elevado fluxo de C e N e outros com menor fluxo. É essa variação que proporciona o acúmulo de MOS, porque ocorrerá sobreposição de resíduos em camadas, devido à resistência à decomposição dos resíduos com maior relação C/N. A recomposição dos compartimentos da MOS e a concentração de carbono (C) em suas frações granulométricas são afetadas pelo preparo do solo (Tabela 2).

Devem ser destacados dois aspectos da Tabela 2: a concentração e o estoque de C aumentam em direção às frações mais finas – associadas ao silte e à argila –, demonstrando que o processo de acúmulo de C é contínuo e governado pelas entradas de resíduo cultural; no plantio direto, o incremento de C na fração mais grosseira (212 – 2000 µ) representa o impacto dos resíduos que irão se acumulando e se transformando em função da atividade da biomassa microbiana, ou seja, a maior concentração de C nas frações lábeis (2000 – 212 e 212 – 53 µm) no plantio direto, quando comparado ao sistema PC, indica que o solo está se comportando como um dreno e em direção ao sequestro.

Esses argumentos foram respaldados pela utilização da técnica isotópica do balanço de massa do isótopo estável do C (¹³C/¹²C). A Figura 5 ilustra a contribuição dos resíduos culturais no plantio direto, há longo período (Sá et. al., 2001). Na fração granulométrica mais grosseira (212 – 2000 µm) da camada de 0 – 2,5 cm, pode-se afirmar que 100% do C é de origem dos resíduos culturais e o aumento do COT, em todas as profundidades amostradas, deu-se das frações mais grosseiras (212 – 2000 µm) para as frações mais finas (< 2 µm) da matéria orgânica (Figura 5), indicando a ocorrência de associações que formam

complexos do tipo “organo-sílticos” e “organo-argílicos” (Feller, 1996).

A matéria orgânica nas frações granulométricas mais grosseiras atua como fonte de energia para a biomassa microbiana e os compostos orgânicos mais estáveis liberados nesse processo atuam como agentes de ligação das frações mais finas. Na mesma linha de pensamento, Golchin et al. (1994) haviam reportado que o fluxo contínuo de compostos orgânicos, liberados durante a mineralização dos resíduos culturais, em associação com a atividade dos fungos do solo, pode conduzir à formação de complexos organominerais estáveis.

A conversão da vegetação natural em áreas agrícolas, com a manutenção do preparo do solo, altera a composição dos reservatórios da MOS, provocando perdas expressivas de COT. As frações lábeis e particuladas apresentam maior redução, sobretudo em razão da ruptura dos agregados, o que as expõe aos processos de transformação pela biomassa microbiana do solo. A mudança de uso da terra com a adoção e a manutenção do plantio direto por longo período, associado a sistemas de rotação de culturas com aporte intensivo de resíduos culturais, recupera a MOS, proporcionando sistemas produtivos com estabilidade. O desafio com o plantio direto, nas diversas regiões climáticas do território brasileiro, está na definição de sistemas de produção que apóiem elevadas quantidades de C e, ao mesmo tempo, sejam lucrativos. 

* **João Carlos de Moraes Sá** é professor adjunto do Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), do Paraná (jems@uepg.br).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B-H. C.; VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.*, v. 35, p. 1599-1607, 2006.

- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; LANGO, S. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci. Am. J.*, v. 65, p. 1473-1478, 2001.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 54, p. 101-109, 2000.
- CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigations options. *Sci. Agric.*, v. 64, p. 83-99, 2007.
- 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*, v. 23, p. 425-432, 1999.
- CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CARDOSO, A.; BERNOUX, M.; DOUZETS, J. M.; SIQUEIRA-NETO, M. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biol.*, v. 12, p. 1773-1787, 2006.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a Southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil Till. Res.*, v. 81, p. 87-95, 2005.
- DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. W. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Ed.). *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu: University of Hawaii Press/NiITAL Project, 1989. p. 33-67.
- Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. *Evolução da área de plantio direto no Brasil*. Disponível em: <www.agri.com.br/febrapdp/pd>. Acesso em: jul. 2008.
- FELLER, C.; ALBRECHT, A.; TESSIER, D. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic soils. In CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (Ed.). *Structure and organic matter in agricultural soils*. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 309-359.
- GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P. Soil structure and carbon cycle. *Australian Journal of Soil Research*, v. 32, p. 1043-1068, 1994.
- REICOSKY, D. C.; KEMPER, W. D.; LANGDALE, G. W.; DOUGLAS Jr., C. L.; RASMUSSEN, P. E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 50, p. 253-261, 1995.
- RESCK, D. V. S. Agricultural intensification systems and their impotential acidity on soil and water quality in the Cerrados of Brazil. In LAL, R. (Ed.). *Soil quality and agricultural sustainability*. Chelsea: Ann Arbor Press, 1998. p. 288-300.
- SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W. A.; VENSKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M.; FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage cronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 65, p. 1486-1499, 2001.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P. dos; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, v. 76, p. 39-58, 2004.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SÁ, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-Effects of no-tillage. *Agronomie*, v. 22, p. 755-775, 2002.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v. 33, p. 141-163, 1982.