

MAIOR DÉFICIT DE SATURAÇÃO DE C NO SOLO É CAPAZ DE PROMOVER MAIOR TAXA DE CONVERSÃO DE C?

**Clever Briedis, João Carlos de Moraes Sá, Daiani Hartman, Juliane Zuffo dos
Santos, Rafael Schimiguel**

Doutorando Universidade Estadual de Ponta Grossa <cleverbriedis@yahoo.com.br>

Resumo - O estudo da saturação de carbono (C) no solo no Brasil é muito incipiente, porém o entendimento dos mecanismos que governam esse processo é de suma importância. O objetivo do estudo foi avaliar as taxas de conversão de C em distintas camadas e solos de diferentes ambientes. O experimento foi conduzido em laboratório com solos provenientes das localidades de Ponta Grossa (PG), Londrina (LDN) e Lucas do Rio Verde (LRV). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em fatorial 3x4, com três repetições. Os fatores foram constituídos de: profundidade de coleta (0-20, 20-40 e 40-100 cm) e adições de C (0, 6, 12 e 24 Mg ha⁻¹) via resíduos de aveia preta. Cada tratamento foi incubado por cinco meses. Após esse período as amostras foram analisadas quanto aos teores de carbono orgânico total (COT), C extraído por permanganato (C-per) e C extraído por água quente (C-aq). Observou-se um ganho linear de COT, C-per e C-aq de acordo com as adições de C, demonstrando que o solo não se encontrava saturado. A taxa de conversão de COT, C-per e C-aq foram maiores na profundidade de 40-100 em todas as localidades. Houve uma relação inversa entre o C da amostra inicial com as taxas de conversão de C. Devido a maior conversão de C em profundidade, o grande desafio nos sistemas de produção é incrementar os aportes de C nesses locais, através de culturas com sistema radiculares mais abundantes e que atinjam tais profundidades.

Palavras-Chave: adição de C, incubação, saturação de C.

IS LARGEST C SOIL SATURATION DEFICIT ABLE TO PROMOTE GREATER CONVERSION RATE OF C?

Abstract - The study of soil carbon (C) saturation in Brazil is very early, but the understanding of the mechanisms that govern this process is very important. The aim of the study was to evaluate the conversion rates of C in different layers and different soil environments. The experiment was conducted in the laboratory with soils from the Ponta Grossa (PG), Londrina (LDN) and Lucas do Rio Verde (LRV). The experimental design was completely randomized in a 3x4 factorial design with three replications. The factors consisted of: depth collection (0-20, 20-40 and 40-100 cm) and C additions (0, 6, 12 and 24 Mg ha⁻¹) via black oats. Each treatment was incubated for five months. After this period the samples were analyzed for concentrations of total organic carbon (TOC), C extracted by permanganate (C-per) and C extracted by hot water (C-aq). There was a linear gain of TOC, C-per and C-aq per accordance with the additions of C, indicating that the soil was not saturated. The conversion rate of TOC, C-per and C-aq were higher at a depth of 40-100 cm in all locations. There was an inverse relationship between the initial content of C with conversion rates of C. Due to higher conversion C in depth, the major challenge in production systems is to increase the contributions of C at these sites, across cultures with abundant root system and reach such depths.

KeyWord: C input, soil incubation, C saturation.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um dos grandes reservatórios de carbono (C) do planeta, com quase três vezes a quantidade de C contido na atmosfera (SCHLESINGER, 1997). Devido a sua grande representatividade no globo, pode atuar como um importante sumidouro de CO₂ atmosférico, com efeitos diretos sobre o efeito estufa (LAL, 2004). Além disso, o C é um fator chave nos processos que ocorrem no solo, tendo influência nas condições químicas (SÁ et al., 2009), físicas (MADARI et al., 2005) e biológicas do solo (SPARLING et al., 1998).

Sistemas conservacionistas que promovam o elevado aporte de resíduos, com maior retorno de C ao sistema, ou práticas que diminuam a oxidação da matéria orgânica, através da manutenção da estrutura do solo, promovem o aumento de C no solo ao longo do tempo (SÁ et al., 2013). No entanto, ainda não existe um entendimento claro da capacidade de cada solo em estocar C, ou seja, não se sabe ao certo se os estoques de C aumentam infinitamente com essas práticas conservacionistas ou se há um limite máximo para a estabilização de C no solo (SIX et al., 2002).

Atualmente, a variação de C no solo ao longo do tempo é estimada baseando-se em modelos que assumem a linearidade entre o aporte de resíduos e o sequestro de C (KONG et al., 2005; Bayer et al., 2006), levando a afirmativa de que o acúmulo de C no solo ocorre por tempo indeterminado. Porém alguns estudos, principalmente em regiões de clima temperado, já apontam em direção para uma estacionada no acúmulo de C para novas adições, demonstrando haver, nessas ocasiões a saturação de C (REICOSKY et al., 2002; HOOKER et al., 2005).

Stewart et al. (2008a), estudando vários experimentos de longa duração com sistemas de manejo, em clima temperado (Estados Unidos e Canadá), demonstraram haver saturação de C em alguns compartimentos específicos do solo, principalmente nos compartimentos de proteção química e bioquímica, assim como os compartimentos de proteção física através da associação com minerais. Por outro lado, não evidenciaram saturação, obtendo aumento linear de C em compartimentos mais lábeis. Com isso concluíram que esses solos ainda não estão totalmente saturados em C, mas devido a atual saturação de alguns compartimentos, o acúmulo futuro de C pode saturar os outros compartimentos que ainda não estão saturados.

Estudos a respeito de saturação de C em solos de região subtropical e tropical são ainda muito escassos, porém alguns, também com respostas positivas a saturação de C. Dos Santos et al. (2011), em um experimento de rotação de culturas

na região dos Campos Gerais, PR (clima subtropical), demonstrou uma relação assintótica entre a adição de C via raízes e estoques de C do solo integral e do C associado aos minerais (fisicamente e quimicamente protegido), concluindo existir a evidência de saturação de C na camada de 0-20 cm desse Latossolo estudado, com a rotação envolvendo alfafa e milho (elevada adição de C via resíduos).

O objetivo do trabalho foi identificar possível saturação de C com adições crescentes de resíduos e entender como é a conversão e C em diferentes camadas de Latossolos de ambientes tropicais e subtropicais do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido com solos provenientes de três localidades: Ponta Grossa (PG), PR (25°09'S - 50°09'W), Latossolo Vermelho Distrófico; Londrina (LDN), PR (23°11'S - 51°11'W), Latossolo Vermelho Eutroférico; e Lucas do Rio Verde (LRV), MT (13°00'S - 55°58'W), Latossolo Vermelho-Amarelo.

Com vistas a representar um perfil de solo a campo e buscando também estudar diferenças nas taxas de conversão de C em solos com diferentes déficits de saturação, as camadas de 0-20, 20-40 e 40-100 cm foram incubadas. Os dados de COT dessas camadas, anterior à incubação, constam na tabela 01.

Tabela 01 – Carbono orgânico total inicial (antes da incubação) das distintas camadas das localidades de Ponta Grossa, Londrina e Lucas do Rio Verde.

Camada	Local		
	Ponta Grossa	Londrina	Lucas do Rio Verde
----- cm -----	----- COT, g kg ⁻¹ -----		
0-20	42,4	17,9	18,5
20-40	27,5	9,7	10,5
40-100	21,4	7,3	7,5

O experimento foi inteiramente casualizado, ficando disposto em um fatorial 3x4 com três repetições. Os fatores foram constituídos de: profundidade de coleta (0-20, 20-40 e 40-100 cm) e adições de C (0, 6, 12 e 24 Mg ha⁻¹) via resíduos de aveia preta.

Cada unidade experimental foi composta por 40 g de solo, juntamente com o resíduo da aveia, os quais foram acondicionados em potes. Durante o período de incubação os potes permaneceram em uma estufa com temperatura controlada a 30 °C e a umidade do solo mantida à capacidade de campo.

Após cinco meses de incubação, os solos foram coletados de maneira deformada, secos em estufa de 40 °C, passados por uma peneira de 2 mm e os todos resíduos, maiores que 2 mm, foram

removidos e considerados como remanescente.

O conteúdo de COT foi determinado pelo método da combustão seca, utilizando um determinador elementar de C (TruSpec CN LECO® 2006, St. Joseph, EUA).

O carbono extraído em água quente (C-aq) foi determinado em amostras de solo conforme descrito por Ghani et al. (2003). Para isso, 3 g de solo foram pesadas em tubos de centrifuga de 15 mL e adicionado 9 mL de água deionizada (relação solo:água 1:3). Os tubos foram agitados manualmente por 10 s para suspender o solo na água e colocados em estufa a 80 °C por 16h. Depois do período de incubação, os tubos foram agitados manualmente para assegurar que o C liberado foi totalmente suspenso e então centrifugados por 30 min a 4000 rpm. Da solução sobrenadante obtida, coletou-se 6 mL para determinação do C pelo método de combustão úmida, modificado de Walkley & Black (1934) e descrito por Nelson & Sommers (1996).

O C extraído por permanganato (Cper) foi realizado de acordo a metodologia modificada de Tirol-Padre & Ladha (2004). Para isso, 1 g de solo com 10 ml de KMnO₄ a 60 Mm foram agitados e centrifugados. Diluiu-se o sobrenadante, e com uma alíquota foi realizada leitura em absorvância a 565 nm. A alteração da concentração de KMnO₄ foi usada para estimar a quantidade de C oxidado.

Para o cálculo das taxas de conversão de COT, Caq e Cper foi utilizado a seguinte equação:

$$TC = C_{t1} - C_{t0}$$

onde, TC é a taxa de conversão; C_{t1} é o conteúdo de COT, Caq e Cper após o período de incubação e C_{t0} é o conteúdo de COT, Caq e Cper anterior ao período de incubação.

Os resultados das taxas de conversão de COT, Caq e Cper nas diferentes camadas foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, através do programa SISVAR 5.1. Análise de regressão linear foi usada para avaliar a relação entre entrada de C via resíduos com os conteúdos de COT, Caq e Cper e conteúdo de COT inicial com as taxas de conversão de COT, Caq e Cper. O nível de significância do coeficiente de determinação (R²) foi encontrada através do programa JMP IN versão 3.2.1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após cinco meses de incubação, observaram-se aumentos lineares, em todas as camadas e em todos os locais, nos conteúdos de COT, Cper e Caq com o aumento das adições de C via resíduos de

aveia (Tabela 2). Essa resposta linear no aumento de C nos seus diferentes compartimentos com adições crescentes demonstra que as camadas de todos os solos coletados não se encontravam saturadas de carbono. Esses dados corroboram com alguns trabalhos, tanto de regiões de clima temperado, sub-tropical e tropical, que indicam uma relação linear positiva entre a adição de C via resíduos com o estoque de C no solo (KONG et al., 2005; BAYER et al., 2006; BRIEDIS et al., 2012a; SÁ et al., 2013). Estudos em regiões temperadas, pelo contrário, já demonstram um estado de solo saturado em C, não havendo alteração no seu estoque mesmo com adições mais elevadas de resíduos orgânicos (STEWART et al. 2008a). Em regiões de clima tropical e subtropical, poucos estudos tem demonstrado tal fato. Entre um deles, Dos Santos et al. (2011) demonstraram, em um experimento de clima subtropical, uma tendência de saturação de C em compartimentos mais estáveis da matéria orgânica.

Devido ao fato de ser um assunto muito novo, o estudo de saturação de C no solo em sistemas agrícolas ainda é pouco explorado, principalmente em condições de clima como as do Brasil. Porém dada a importância do tema, novos estudos precisam ser realizados para ter-se a concepção de como se dá a migração, estabilização e a possível saturação de C no solo. Para um aprofundamento maior sobre o tema, a avaliação somente do compartimento total de C muitas vezes não basta, sendo o fracionamento do solo uma ferramenta indispensável para uma compreensão mais detalhada. Nesse intuito, Six et al. (2002) propuseram fracionar o solo em quatro compartimentos de proteção do C. Nesse modelo, o solo é estabilizado através de associações químicas com partículas de silte e argila, de proteção física dentro de microagregados, da complexidade bioquímica das moléculas orgânicas e um último compartimento não protegido que é limitado pelo balanço das entradas de C e pela decomposição, sendo governado principalmente pelo clima. Segundo esse conceito, o solo integral torna-se saturado devido ao efeito cumulativo desses quatro compartimentos do C.

Tabela 02 – Equações de regressão da relação entre adição de C (Mg ha⁻¹) via resíduos de aveia e C total (COT), C extraído por água quente (C-aq) e C extraído por permanganato (C-per) após cinco meses de incubação de três camadas de solo de Ponta Grossa, Londrina e Lucas do Rio Verde.

Local	Camada COT		C-aq		C-per		
	cm	Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
Ponta Grossa	0-20	y = 0,051x + 40,2	0,65	y = 0,0056x + 0,37	0,81	y = 0,007x + 4,3	0,95
	20-40	y = 0,047x + 26,6	0,96	y = 0,0065x + 0,15	0,99	y = 0,011x + 3,1	0,97
	40-100	y = 0,055x + 20,6	0,91	y = 0,0106x + 0,06	0,88	y = 0,012x + 2,9	0,99
Londrina	0-20	y = 0,074x + 15,9	0,97	y = 0,0059x + 0,25	0,91	y = 0,017x + 3,6	0,90
	20-40	y = 0,066x + 9,2	0,95	y = 0,0056x + 0,18	0,98	y = 0,015x + 2,9	0,97
	40-100	y = 0,060x + 7,2	0,84	y = 0,0081x + 0,21	0,89	y = 0,021x + 2,7	0,90
Lucas do Rio Verde	0-20	y = 0,150x + 15,2	0,94	y = 0,0084x + 0,19	0,97	y = 0,023x + 3,6	0,87
	20-40	y = 0,041x + 10,2	0,74	y = 0,0100x + 0,07	0,96	y = 0,018x + 2,7	0,96
	40-100	y = 0,054x + 7,2	0,72	y = 0,0092x + 0,11	0,99	y = 0,013x + 2,6	0,66

As taxas de conversão de COT, em todas as localidades, foram negativas na camada de 0-20 cm (Tabela 3). Devido aos solos usados para a incubação serem coletados em áreas sob plantio direto, de média e longa duração (PG = 28 anos; LDN = 23 anos; LRV = 8 anos), grande quantidade de C lábil na camada superficial, é esperada nesses locais (BRIEDIS et al., 2012b). Como, para a incubação, foram usados solos coletados de forma indeformada e moídos, pode ter ocorrido a liberação dessa fração lábil, que estava protegida pela agregação, aumentada em plantio direto (TIVET et al., 2013a), ficando ela disponível para a oxidação microbiana, a qual foi beneficiada pelas ótimas condições de temperatura e umidade da incubação. Esse processo é semelhante ao ocorrido quando ocorre a conversão da mata para sistemas de cultivo como o plantio convencional. Nesse sentido, Tivet et al., (2013b) demonstraram que a conversão da vegetação nativa para sistemas de cultivo com elevada movimentação do solo, leva, em ambientes tropicais e sub-tropicais, a um decréscimo acentuado no COT, principalmente das frações mais lábeis que são fonte de energia para a biota do solo.

Tabela 03 – Taxas de conversão de C total (COT), C extraído por permanganato (C-per) e C extraído por água quente (C-aq) após cinco meses de incubação de três camadas de solo de experimentos de Ponta Grossa, Londrina e Lucas do Rio Verde.

Camada	Local		
	Ponta Grossa	Londrina	Lucas do Rio Verde
-- cm --	----- COT, g kg ⁻¹ -----		
0-20	-1,7 b	-1,2 c	-1,6 b
20-40	-0,5 a	0,2 b	0,2 a
40-100	-0,3 a	0,7 a	0,3 a
	----- C-per, g kg ⁻¹ -----		
0-20	0,09 c	0,10 ab	0,11 b
20-40	0,19 b	0,08 b	0,04 c
40-100	0,23 a	0,17 a	0,19 a
	----- C-aq, g kg ⁻¹ -----		
0-20	-0,08 c	0,11 b	0,06 b
20-40	-0,01 b	0,10 b	0,07 b
40-100	0,09 a	0,26 a	0,17 a

Apesar de não demonstrar saturação de C em nenhuma camada de nenhum ambiente, as taxas de conversão de COT, de Caq e de Cper foram superiores na camada de 40-100 em todas as localidades (Tabela 3). Nessa camada os teores de C são os menores (Tabela 1). Segundo Stewart et al. (2008b), solos com menores teores de C possuem um déficit maior de saturação do que aqueles com teores mais elevados de C.

Confirmando essa hipótese, observamos uma relação inversa do conteúdo inicial de COT com as taxas de conversão de COT, ou seja, quanto menor a quantidade de C no solo, maior é a conversão dos resíduos (Figura 1a). Nesse sentido camadas subsuperficiais possuem um grande potencial para converter e estabilizar o C adicionado. Como em PD

não há mobilização do solo para levar os resíduos até certas camadas, há a necessidade de se trabalhar, nos sistemas de rotação, com culturas de sistemas radiculares abundantes e profundos. Com isso, nossos resultados mostram a necessidade na obtenção de cultivares com tais características de sistemas radiculares, abrindo um novo horizonte para melhoristas de plantas.

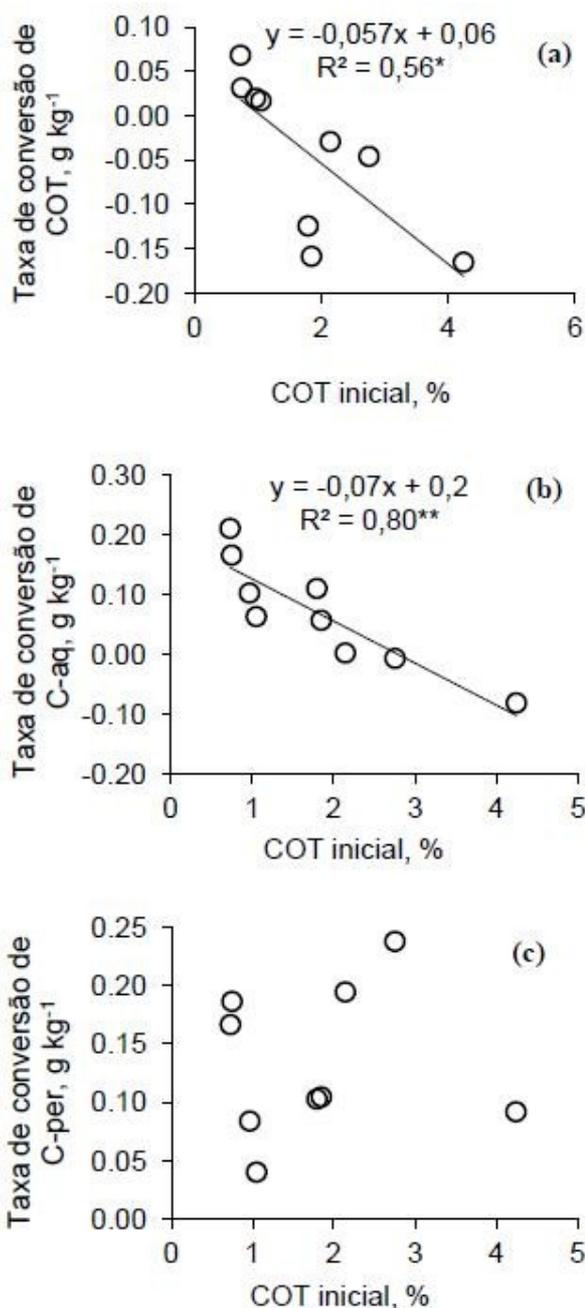


Figura 01 – Relação do conteúdo de COT inicial com as taxas de conversão de: (a) COT; (b) C extraído em água quente; e (c) C extraído por permanganato, após cinco meses de incubação.

* e ** significativo a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

A relação de COT inicial com a conversão de C_q também foi inversa (Figura 1b). Por outro lado, o COT inicial não teve relação alguma com as taxas de conversão de C_{per} (Figura 1c).

4. CONCLUSÕES

Nenhum dos ambientes e camadas estudadas apresenta indícios de saturação de carbono. Camadas mais profundas, onde o teor de C é menor, apresentam déficit de saturação de C maior do que camadas superficiais. A taxa de conversão de C é maior em camadas subsuperficiais.

5. AGRADECIMENTOS

Nós gostaríamos de agradecer à Capes pela concessão de bolsa ao primeiro autor e à Fundação Agrisus pelo apoio financeiro ao projeto (PA 965/12).

REFERÊNCIAS

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 & Tillage Research**, v.91, p. 217-226, 2006.

BRIEDIS, C.; SÁ, J.C.M.; DE CARLI, R.S.; ANTUNES, E.A.P.; SIMON, L.; ROMKO, M.L.; ELIAS, L.S.; FERREIRA, A.O. Particulate soil organic carbon and stratification ratio increases in response to crop residue decomposition under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p. 1483-1490, 2012.

DOS SANTOS, N.Z.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; PIVA, J.T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. **Soil & Tillage Research**, v.111, p. 208-218, 2011.

GHANI, A.; DEXTER, M.; PERROTT, K.W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. **Soil Biology & Biochemistry**, v.35, p. 1231-1243, 2003.

HOOKE, B.A.; MORRIS, T.F.; PETERS, R.; CARDON, Z.G. Long-term effects of tillage and corn stalk return on soil carbon dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p. 188-196, 2005.

MADARI, B.; MACHADO, P.L.O.A.; TORRES, E.; ANDRADE, A.G.; VALENCIA, L.I.O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.80, p.185-200, 2005.

KONG, A.Y.Y.; SIX, J.; BRYANT, D.C.; DENISON, R.F.; VAN KESSEL, C. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p. 1078-1085, 2005.

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

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon

and organic matter. In **Method of soil analysis: chemical methods**. Parte 3. D. L. Sparks. Soil Science Society of America, Madison, pp. 961-1010, 1996.

REICOSKY, D.C.; EVANS, S.D.; CAMBARDELLA, C.A.; ARMARAS, R.R.; WILTS, A.R.; HUGGINS, D.R. Continuous corn with moldboard tillage: residue and fertility effects on soil carbon. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.57, p. 277-284, 2002.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v.104, p.56-64, 2009.

SÁ, J.C.M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P.R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J.B.; HARTMAN, D.C.; BERTOLONI, C.G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by ploughing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of sub-tropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, 2013. Accepted Article. doi: 10.1002/ldr.2218

SCHLESINGER, W.H. **Biogeochemistry: An Analysis of Global Change**, 2nd edn. Academic Press Inc., San Diego, CA, 1997.

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

SPARLING, G.; VOJVODIC-VUKOVIC, M.; SCHIPPER, L.A. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, v.30, p.1469-1472, 1998.

STEWART, C.E.; PLANTE, A.F.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R.T.; SIX, J. Soil C saturation: linking concept and measurable carbon pools. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p. 379-392, 2008a.

STEWART, C.E.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R.T.; PLANTE, A.F.; SIX, J. Soil carbon saturation: evaluation and corroboration by long-term incubations. **Soil Biology & Biochemistry**, v.40, p. 1741-1750, 2008b.

TIROL-PADRE, A.; LADHA, J.K. Assessing the reliability of permanganate oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p. 696-978, 2004

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

TIVET, F.; SÁ, J.C.M.; LAL, R.; BORSZOWSKI, P.R.; BRIEDIS, C.; DOS SANTOS, J.B.; SÁ, M.F.M.; HARTMAN, D.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.210, p. 214-225, 2013b.

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