



## Potencial de sequestro de carbono em um sistema integrado de produção agropecuária de longa duração

**Diego Cecagno**<sup>(1)</sup>; **Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade Costa**<sup>(2)</sup>; **Amanda Posselt Martins**<sup>(2)</sup>; **Ibanor Anghinoni**<sup>(3)</sup>; **Cimelio Bayer**<sup>(3)</sup>; **Paulo César de Faccio Carvalho**<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Estudante de mestrado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, RS; [dcecagno@hotmail.com](mailto:dcecagno@hotmail.com). <sup>(2)</sup> Estudante de doutorado; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; [sergioelycosta2011@hotmail.com](mailto:sergioelycosta2011@hotmail.com); [amandaposselt@gmail.com](mailto:amandaposselt@gmail.com). <sup>(3)</sup> Professor; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; [ibanghi@ufrgs.br](mailto:ibanghi@ufrgs.br); [cimelio.bayer@ufrgs.br](mailto:cimelio.bayer@ufrgs.br); [paulocfc@ufrgs.br](mailto:paulocfc@ufrgs.br).

**RESUMO:** O preparo de solo e sistema de culturas utilizado acarreta em modificações no fluxo de carbono do solo. Sistemas integrados de produção agropecuária em plantio direto podem vir a ser alternativas para manter, ou até mesmo aumentar os estoques de carbono do solo. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar predições a respeito do potencial de sequestro de carbono no solo, pelo uso de um modelo unicompartimental. O trabalho foi desenvolvido em experimento em execução no município de São Miguel das Missões, RS, Região Sul do Brasil. Os tratamentos avaliados consistiram de diferentes intensidades de pastejo, reguladas pela altura de manejo do pasto, sendo: 10, 20, 30 e 40 cm, além de áreas sem pastejo. O solo, para avaliação dos estoques de COT, foi coletado na camada de 0-20 cm, após a colheita da soja (maio de 2014). Predições do modelo utilizado indicam que os sistemas mais intensivos de pastejo (10 e 20 cm de altura) não conseguem chegar aos estoques da mata nativa ao longo do tempo. Já os sistemas de pastejo com intensidade moderada (30 e 40 cm de altura) e sem pastejo apresentam potencial de sequestro de carbono suficiente para superar os da mata nativa.

**Termos de indexação:** matéria orgânica, intensidade de pastejo, modelo de predição.

### INTRODUÇÃO

O carbono orgânico total (COT) é o principal componente da matéria orgânica do solo (MOS). Os estoques de COT em um solo agrícola dependem da condição inicial destes elementos, da quantidade de resíduos que é aportado anualmente, da taxa de humificação destes resíduos e da taxa de perda da MOS. Em solos sem ação antrópica, os estoques de C são afetados pela temperatura, umidade e tipo de solo (Bayer & Mielniczuk, 1997).

Diversos modelos foram propostos para explicar as variações no estoque de COT no solo ao longo do tempo. Dentre eles, estão os modelos unicompartimentais, como o proposto por Hénin & Dupuis (1945):

$$dC / dt = -K_2 \cdot C + K_1 \cdot A \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $dC / dt$  expressa a taxa de variação no tempo do conteúdo de COT ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ),  $A$  é a quantidade de carbono (C) adicionado ao solo anualmente ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ),  $C$  é o estoque de COT do solo ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ),  $K_1$  é a fração de C que é adicionado anualmente e que passará a constituir a MOS (coeficiente isohúmico) e  $K_2$  é o coeficiente de perda anual do COT por oxidação microbiana, erosão e lixiviação.

Na prática, o sistema de preparo do solo e a prática de sucessão ou rotação de culturas afetam basicamente os coeficientes  $K_2$  e  $A$  do modelo matemático apresentado. O parâmetro  $A$  representa a produção de biomassa de cada sistema de sucessão de culturas empregado ao longo do ano. Assim, num contexto de SIPA, sistemas de pastejo mais intensivos terão, em contrapartida, menores adições anuais de C ao solo, enquanto que sistemas de pastejo mais equilibrados ou sem pastejo terão maiores adições de C ao solo (Carvalho et al., 2011).

Os coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  podem ser determinados em experimentos de longa duração, com valores de  $A$  e  $C_0$  (estoque de carbono no início do experimento) conhecidos (Mielniczuk et al., 2003). O parâmetro  $K_1$  varia de acordo com o clima local e é calculado a partir de equações lineares que correlacionam as quantidades de C adicionados anualmente ( $A$ ) e a variação dos estoques de COT no solo em relação ao seu estoque original no solo (Mielniczuk et al., 2003). O parâmetro  $K_2$  é influenciado pelo método de preparo e textura do solo. São encontradas taxas de mineralização da MOS menores em solos argilosos (Dalal & Mayer, 1986), devido à maior proteção física que estes solos possuem.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi realizar predições a respeito do potencial de sequestro de carbono no solo, em um sistema integrado de produção de soja e bovinos de corte, no subtropico brasileiro, submetido a diferentes intensidades de pastejo por 13 anos.

### MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em um experimento que vem sendo conduzido desde maio de 2001 no município de São Miguel das Missões,



no estado do Rio Grande do Sul – Brasil. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, de textura argilosa. Antes do início do experimento a área vinha sendo cultivada em sistema de plantio direto desde 1993, com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no verão. No inverno do ano de 2000, a área foi utilizada para o pastejo de animais pela primeira vez. No outono de 2001 foi iniciado o experimento com estabelecimento da pastagem de aveia preta + azevém (*Lolium multiflorum* Lam.).

Os tratamentos constam de diferentes alturas de manejo do pasto: 10, 20, 30 e 40 cm, além de parcelas sem pastejo. As alturas de pastejo são distribuídas num delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições. Tem-se utilizado bovinos jovens, com idade ao redor de 12 meses em pastejo contínuo. Geralmente, os animais entram na área quando a pastagem atinge um acúmulo médio em torno de 1500 kg de massa seca ha<sup>-1</sup>. De uma forma geral, os animais iniciam o ciclo de pastejo em julho e permanecem na área até novembro. Em torno de 45 dias após a semeadura da pastagem é realizada uma adubação nitrogenada de cobertura, com dose variando de 45 a 90 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, na forma de ureia.

Para o presente trabalho, foi realizada coleta de solo após treze anos da implantação do experimento. A amostragem foi feita após a colheita da soja (maio) da safra agrícola de 2013/2014, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm, utilizando pá de corte. As amostras foram compostas por seis subamostras dentro de cada parcela. Após, foram secadas a 40 °C, retirada de raízes e resíduos e, por fim, moagem em almofariz. As amostras moídas foram enviadas para o Laboratório de Solos da Universidade Federal de Santa Maria e analisadas por combustão seca em aparelho analisador elementar Analyser Organic Elementar Flash 2000.

Os valores de K<sub>1</sub> e K<sub>2</sub> utilizados para este trabalho foram de 0,18 e 0,011 ano<sup>-1</sup>, conforme estabelecido por Cecagno et al. (2014), para o mesmo protocolo experimental.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativa (p<0,05), as médias foram comparadas pelo teste Tukey (p<0,05). O seguinte modelo estatístico foi utilizado na ANOVA:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + T_j + \text{Erro} (ij)$$

Onde:  $\mu$  = média geral do experimento; B = bloco (i = 1, 2, 3); T = tratamentos (intensidades de pastejo e mata) (j = 1, 2, 3, 4, 5, 6); e Erro = erro experimental.

Para descrever a dinâmica da matéria orgânica foi usado um modelo unicompartmental, proposto por Hénin & Dupuis (1945). Este é um modelo

simples, o que facilita a sua aplicação, levando à obtenção de velocidades médias de mineralização específicas para o local, condições climáticas, tipo de solo e histórico cultural. O modelo utiliza um balanço médio de entradas e saídas de materiais orgânicos no período de um ano, não levando em conta a cinética intra-anual.

Reordenando os termos da Equação 1, conforme Bayer et al. (2006), é possível determinar o estoque de carbono em um tempo t (C<sub>t</sub>), por intermédio da equação 2:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-K_2 t} + K_1 \cdot A / K_2 (1 - e^{-K_2 t}) \quad (\text{Equação 2})$$

onde o termo C<sub>0</sub> representa o estoque de COT do solo no início do experimento (t = zero). A primeira parte da equação (C<sub>0</sub>·e<sup>-K<sub>2</sub>t</sup>) se refere à perda do carbono já existente no solo ao longo do tempo, enquanto a segunda parte da equação [K<sub>1</sub>·A/K<sub>2</sub> (1 - e<sup>-K<sub>2</sub>t</sup>)] diz respeito à humificação do carbono adicionado ao solo ao longo do tempo.

Em posse da Equação 2, constata-se que, quando o tempo tende a 0, C<sub>t</sub> = C<sub>0</sub>, e quando o tempo tende ao infinito, C<sub>t</sub> = C<sub>e</sub> = K<sub>1</sub>·A / K<sub>2</sub>. O rearranjo da Equação 2 também permite calcular o tempo de meia vida (t<sub>1/2</sub>), o qual expressa o período de tempo, em anos, necessário para que o conteúdo de carbono orgânico altere numa quantidade igual a metade da diferença entre C<sub>0</sub> e C<sub>e</sub> (Dalal & Mayer, 1986).

$$t_{1/2} = (\ln 2) / K_2 \quad (\text{Equação 3})$$

As análises estatísticas de falta de ajuste (*Lack of Fit*, LOFIT) e raiz quadrada do erro (*Root Mean Square Error*, RMSE) foram utilizadas para verificar a acurácia das simulações em relação aos dados mensurados, segundo proposição de Smith et al. (1997), pelo uso do programa Modeval 2.0.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo necessário para o C estabilizar no solo (suas entradas serem iguais às saídas), mantendo-se os atuais manejos, é dependente da taxa de humificação dos resíduos e decomposição da MOS. Assim, por utilizarem a mesma taxa média de humificação e decomposição, todos os tratamentos levarão o mesmo tempo para estabilizar. O estoque de COT que cada tratamento será capaz de acumular (C<sub>e</sub>) (Tabela 1) pode ser obtido usando-se a Equação 2. Esse valor é um indicativo do potencial de sequestro de carbono que cada tratamento possui.

**Tabela 1.** Predição do acúmulo da matéria orgânica do solo pelo modelo unicompartmental em sistema integrado de produção soja-bovinos de



corde submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto

Tratamento	COT atual <sup>1</sup>	COT <sub>50% Ce</sub> <sup>2</sup>	COT <sub>Ce</sub> <sup>3</sup>
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----		
10 cm	52,06 b <sup>4</sup>	54,98	58,99
20 cm	53,21 b	59,25	67,56
30 cm	54,96 b	65,70	80,49
40 cm	54,87 b	65,37	79,84
SP	54,72 b	64,81	78,71
Mata	71,98 a	71,98	71,98

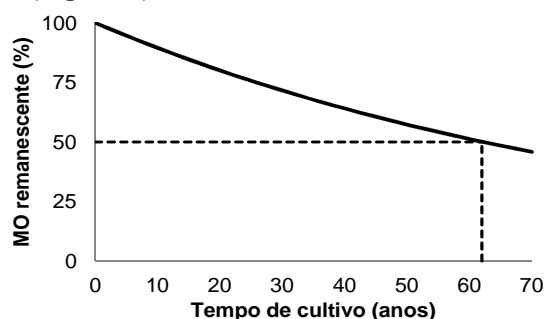
<sup>1</sup> Carbono orgânico total ajustado pela regressão linear; <sup>2</sup> 50% da variação entre os estoques de COT no início do experimento e o Ce; <sup>3</sup> Carbono orgânico total a que o sistema tenderá a estabilizar; <sup>4</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

O modelo considera que não haverá variação nas condições de clima no período de predição. Apesar de indicativos que estamos em um processo de aquecimento global, a temperatura influencia muito menos nos estoques de COT do que o volume e distribuição de chuvas (Selmants et al., 2014). Ainda assim, a maioria de estudos sobre aquecimento global e decomposição da MOS são feitos focando-se em compartimentos da MOS com "turnover" muito curto, o que superestimaria o efeito da temperatura na dinâmica da MOS. Aumentos na temperatura também influenciariam a adição de resíduos, visto que aumenta a probabilidade de perda de produtividade das culturas (Lobell & Tebaldi, 2014).

Segundo o modelo utilizado, o solo no pastejo a 30 cm de altura de manejo de pasto tenderá a ter seu estoque de C estabilizado no valor de 80,5 Mg ha<sup>-1</sup>, apresentando o maior valor de Ce entre os sistemas avaliados, sendo superior à mata, tomada como referência e em equilíbrio dinâmico. Braz et al. (2013) ressaltam que pastagens produtivas podem apresentar estoques de COT superiores à vegetação nativa. Por outro lado, no extremo inferior, o estoque de COT do solo no pastejo a 10 cm tenderá ao valor de 59 Mg ha<sup>-1</sup>, o que equivale a 73% do estoque do tratamento 30 cm, na camada de 0-20 cm. São mais de 20 Mg C ha<sup>-1</sup> que vão deixar de ser fixados no solo considerando apenas a camada de 0-20 cm, e este valor seria ainda maior se fossem levadas em consideração as camadas mais profundas (Harper & Tibbett, 2013). Também se observa que o pastejo a 10 cm está muito próximo de atingir seu potencial de sequestro de carbono (Ce), visto que faltam menos de 7 Mg ha<sup>-1</sup> para isso.

A adição de 25,5 Mg ha<sup>-1</sup>, no pastejo a 30 cm, começa a perder importância, quando comparado a outros protocolos experimentais, devido ao baixo aporte anual de carbono (menos de 5 Mg ha<sup>-1</sup>). Vieira (2007), trabalhando com o consórcio gandu+milho, em um Argissolo, encontrou Ce de 27,3 Mg ha<sup>-1</sup>. Ou seja, mesmo com um coeficiente de perda 27% maior que o do presente experimento, conseguiu ter 7% a mais de sequestro de carbono no solo. Isso se deve ao alto aporte de resíduo que essas culturas proporcionam (7,84 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Da mesma forma, Bayer et al. (2000), no sistema aveia+ervilhaca/milho+caupi, com um K<sub>2</sub> 163% maior, conseguirá adicionar 87% do que no protocolo experimental em pauta. Isso evidencia a importância da adição de resíduos ao sistema, para não apenas manter o balanço de carbono, mas para a mitigação dos gases de efeito estufa (Bayer et al., 2011).

O t<sub>1/2</sub>, obtido a partir da Equação 3, expressa o período de tempo, em anos, necessário para que o conteúdo de carbono orgânico altere numa quantidade igual a metade da diferença entre C<sub>o</sub> e C<sub>e</sub> (Dalal & Mayer, 1986). Este valor é inversamente proporcional ao coeficiente de perda de matéria orgânica. O t<sub>1/2</sub> do presente experimento é de 62 anos (Figura 1).



**Figura 11.** Projeção da variação dos estoques de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-20 cm, com o passar do tempo (tempo de meia vida), em sistema integrado de produção soja-bovinos de corte submetido a diferentes intensidades de pastejo, em plantio direto

Comparativamente ao preparo convencional, o t<sub>1/2</sub> é alto. Em condições de subtropical, Andriulo et al. (1999) e Garcia-Préach et al. (2004) encontraram t<sub>1/2</sub> de 25 anos na Argentina e 40 anos no Uruguai, respectivamente. No Rio Grande do Sul, Pöttker (1977) encontrou t<sub>1/2</sub> de 15 anos. Percebe-se que, à medida que se aumenta a latitude, diminui-se o t<sub>1/2</sub>. Silva et al. (1994), trabalhando no Cerrado brasileiro (oeste da Bahia), encontraram t<sub>1/2</sub> de apenas 3 anos. Nessa situação pode ter havido um processo erosivo intenso atuando simultaneamente com a atividade microbiana.



## CONCLUSÕES

Predições do modelo indicam que os sistemas de intensidade moderada de pastejo e sem pastejo apresentam potencial de sequestro de carbono suficiente para superar os estoques da mata nativa, enquanto pastejos mais intensivos não superarão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de mestrado; e à Fundação AGRISUS pelo apoio a esta participação no XXXV CBCS, e pelos apoios que já vêm concedendo ao Grupo de Pesquisa em Integração Lavoura-Pecuária da UFRGS.

## REFERÊNCIAS

ANDRIULO, A. E; MARY, B.; GUERIF, J. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomic*, 19:365-377, 1999.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil & Tillage Research*, 91:217-226, 2006.

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21:105-112, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24:599-607, 2000.

BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. *Tópicos em Ciências do Solo*, 7:55-118, 2011

BRAZ, S. P. et al. Soil carbon stocks under productive and degraded *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. *Soil Science Society of America Journal*, 77:914-928, 2013.

CARVALHO, P. C. F. et al. Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil. Porto Alegre: Gráfica RJR, 2011, 60 p.

CECAGNO, D. et al. Balanço de carbono em sistema integrado de produção agropecuária com semeadura direta. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 20., 2014, Cusco. Proceedings... Cusco: Sociedad Peruana de la Ciencia del Suelo, 2014. p. 1-6.

DALAL, R. C. & MAYER, R. J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. II Total organic carbon and its

rate of loss from the soil profile. *Australian Journal of Soil Research*, 24:281-292, 1986.

GARCIA-PRÉCHAC, F. et al. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil & Tillage Research*, 77:1-13, 2004.

HARPER, R. J. & TIBBETT, M. The hidden organic carbon in deep mineral soils. *Plant and Soil*, 368:641-648, 2013.

HÉNIN, S. & DUPUIS, M. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques*, 15:161-172, 1945.

LOBELL, D. B. & TEBALDI, C. Getting caught with our plants down: the risks of a global crop yield slowdown from climate trends in the next two decades. *Environmental Research Letters*, 9:1-8, 2014.

MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solos e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, 3:209-248, 2003.

PÖTTKER, D. Efeito do tipo de solo, tempo de cultivo e da calagem sobre a mineralização da matéria orgânica em solos do Rio Grande do Sul [Dissertação]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1977.

SELMANTS, P. C. et al. Ecosystem carbon storage does not vary with mean annual temperature in Hawaiian tropical montane wet forests. *Global Change Biology*, 20:2927-2937, 2014.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste Baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18:541-547, 1994.

SMITH, P. et al. Evaluation and comparison of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81:153-225, 1997.

VIEIRA, F. C. B. Estoques e labilidade da matéria orgânica e acidificação de um Argissolo sob plantio direto afetados por sistemas de culturas e adubação nitrogenada [Tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.