

A ROTAÇÃO DE CULTURAS AUMENTA OS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO¹

Rodrigo da Silveira Nicoloso, Telmo J. C. Amado, Charles W. Rice, Carlos Augusto Bonini Pires, Jackson E. Fiorin

RESUMO

A expansão da agricultura com o uso de sistemas intensivos de preparo do solo (aração, gradagem, entre outros) promoveu o decréscimo de até 75% dos teores originais de matéria orgânica dos solos sob florestas ou pastagens naturais. Em 12.000 anos de agricultura e mais notadamente nos últimos 200 anos, cerca de 133 trilhões de toneladas foram perdidas devido ao incremento da taxa de mineralização da matéria orgânica ou erosão dos solos agrícolas sob preparo intensivo. Em contrapartida, o desenvolvimento de novos sistemas de produção agrícola, tais como o Sistema Plantio Direto, promoveram a recuperação parcial dos estoques de carbono do solo, contribuindo para uma maior sustentabilidade na agropecuária. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o impacto de 22 anos de sistemas de manejo de solo e rotação de culturas sob os estoques de carbono e nitrogênio até um metro de profundidade de um latossolo, utilizando, para tanto, o histórico do experimento de longa duração da CCGL TEC. Este estudo demonstrou que a adoção do Sistema Plantio Direto, com mínima mobilização do solo e manutenção de cobertura vegetal na superfície do solo, aumentou os estoques de carbono e nitrogênio na camada mais superficial (0-5 cm), em comparação ao solo manejado com preparo convencional. No entanto, o aumento da diversidade de espécies e do aporte de carbono com o uso de rotação de culturas promoveu, após 22 anos, acúmulo de carbono e nitrogênio também em maior profundidade (0-30 cm). Ainda, o acúmulo de carbono na camada 0-30 cm se manteve significativo quando o solo foi amostrado até um metro de profundidade, indicando que não houve perdas de carbono nas camadas mais profundas de solo. O aumento da quantidade de grandes macroagregados do solo (>2 mm) e a maior concentração de carbono no interior destes agregados indicaram que a proteção física da matéria orgânica do solo foi o principal mecanismo responsável pelo acúmulo de carbono no solo com o Sistema Plantio Direto. Desta maneira, a manutenção do Sistema Plantio Direto é fundamental para a permanência do carbono acumulado nas camadas mais superficiais do solo no longo prazo, visto que o provável rompimento destes agregados através do preparo do solo poderia expor esta fração do carbono à atividade microbiana.

PALAVRAS-CHAVE

Carbono orgânico do solo. Agregação do solo. Sequestro de carbono. Plantas de cobertura.

¹ Parte da tese de doutorado do primeiro autor, Universidade Federal de Santa Maria.

ABSTRACT

The expansion of agriculture with the use of intensive systems of tillage (plowing, disking, among others) promoted the decrease of up to 75% of the original levels of organic matter of the soils under forest or natural pastures. In 12,000 years of agriculture and most notably in the last 200 years, about 133 trillion tons were lost due to the increase in the rate of mineralization of organic matter or erosion of agricultural soils under intensive tillage. In contrast, the development of new agricultural production systems, such as the No-Till system, promoted the partial recovery of soil carbon stocks, contributing to greater sustainability in agriculture. In this way, the objective of this work was to evaluate the impact of 22 years of systems of soil management and crop rotation under the carbon and nitrogen stocks up to 1 meter deep of an Oxisol, using the history of the long-term experiment of CCGL TEC. This study demonstrated that the adoption of the No-Till system, with minimal soil mobilization and maintenance of vegetation cover on the soil surface, increased the carbon and nitrogen stocks in the most superficial layer (0-5 cm) in comparison to the soil managed under conventional tillage. However, the increase of species diversity and carbon input with the use of crop rotation promoted, after 22 years, accumulation of carbon and nitrogen also in greater depth (0-30 cm). Also, carbon accumulation in the 0-30 cm layer remained significant when the soil was sampled up to 1 meter in depth, indicating that there were no carbon losses in the deeper layers of soil. The increase in the number of large macroaggregates in the soil (> 2 mm) and the higher carbon concentration within these aggregates indicated that the physical protection of soil organic matter was the main mechanism responsible for soil carbon accumulation under No-Till system. In this way, the maintenance of the No-Till system is fundamental for the permanence of the accumulated carbon in the more superficial layers of the soil in the long term, since the probable rupture of these aggregates through the preparation of the soil could expose this fraction of the carbon to the microbial activity.

KEYWORDS

Soil Organic Carbon. Soil aggregation. Carbon sequestration. Cover crops.

8.1 INTRODUÇÃO

A expansão da agricultura com o uso de sistemas intensivos de preparo do solo (aração, gradagem, entre outros) promoveu o decréscimo de até 75% dos teores originais de matéria orgânica dos solos sob floresta ou pastagens naturais (LAL, 2010). Em 12.000 anos de agricultura e mais notadamente nos últimos 200 anos, em torno de 133 pg (133 trilhões de toneladas) de carbono (que compõe 58% da matéria orgânica do solo) foram perdidos devido ao incremento da taxa de mineralização da matéria orgânica ou erosão dos solos agrícolas com preparo intensivo (SANDERMAN et al., 2017), aliado à perda de biodiversidade dos ecossistemas agrícolas e redução no aporte de resíduos vegetais. Este processo comprometeu a qualidade e a produtividade dos solos agrícolas e contribuiu com o aumento das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera (JAT et al., 2014; SMITH et al., 2008; KARLEN, RICE, 2015; FERREIRA et al., 2013).

Em contrapartida, o desenvolvimento de novos sistemas de produção agrícola, tais como o Sistema Plantio Direto, promoveram a recuperação parcial dos estoques de matéria orgânica do solo, contribuindo para maior sustentabilidade na agropecuária (SIX, PAUSTIAN, 2014; REICHERT et al., 2016a). Desta maneira, manejar adequadamente os estoques de matéria orgânica do solo é a base para a melhoria da qualidade do solo e da água, contribuindo para que a agricultura atenda de maneira sustentável e economicamente viável a crescente demanda por alimentos, biocombustíveis e demais produtos agropecuários (JAT et al., 2014). Além de carbono, a matéria orgânica do solo é composta por nitrogênio (cerca de 5%) e outros nutrientes essenciais às plantas. A matéria orgânica melhora a estrutura e reduz a densidade do solo e aumenta o armazenamento de água e a ciclagem de nutrientes com efeitos positivos, tanto na produtividade das culturas, quanto para o meio ambiente (BLANCO-CANQUI et al., 2009; FERREIRA et al., 2013). A matéria orgânica é especialmente importante em regiões tropicais onde predominam solos altamente ácidos e intemperizados, nos quais prevalecem argilominerais de baixa atividade do tipo 1:1 ou óxidos. Nestes solos, a matéria orgânica é responsável por mais de 80% capacidade de troca de cátions (CTC) do solo e reduz a toxidez de alumínio para as plantas.

A agricultura conservacionista tem por princípios básicos a redução do preparo do solo, a cobertura permanente do solo por resíduos vegetais e a rotação de culturas (PITTELKOW et al., 2015). Estas práticas são indicadas para o controle da erosão e para a melhoria da qualidade do solo através do aumento dos estoques de matéria orgânica do solo. O Sistema Plantio Direto é o componente principal da agricultura conservacionista por atender, no mínimo, dois de seus princípios: mínima mobilização do solo e manutenção da palhada na superfície do solo. Neste sentido, a literatura científica tem demonstrado que o Sistema Plantio Direto tem aumentado os estoques de carbono do solo, especialmente nas camadas mais superficiais (FERREIRA et al., 2013; WEST, POST, 2002). No entanto, as taxas de acúmulo de carbono no solo sob plantio direto são relativamente baixas e dependem diretamente do aporte de resíduos vegetais na superfície do solo (BAYER et al., 2006; NICOLOSO et al., 2008).

A adoção do Sistema Plantio Direto em áreas anteriormente submetidas ao preparo convencional tem o potencial de promover aumento nos estoques de carbono no solo a uma taxa de $570 \pm 140 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (média global) durante 15-20 anos, quando os estoques de carbono no solo atingem um novo equilíbrio (WEST, POST, 2002). Assim, a associação dos conceitos básicos do Sistema Plantio Direto com sistemas de culturas que promovem maior diversidade de espécies, incluindo tanto gramíneas e leguminosas, e maior aporte de resíduos à superfície do solo através da rotação de culturas (o terceiro princípio da agricultura conservacionista), tem sido indicada como prática para aumentar as taxas de acúmulo de carbono no solo (CALEGARI et al., 2008; VIEIRA et al., 2009; ZOTARELLI et al., 2012). Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o impacto de 22 anos de sistemas de manejo de solo e rotação de culturas, sobre os estoques de carbono e nitrogênio até um metro de profundidade de um latossolo, utilizando, para tanto, o histórico do experimento de longa duração localizado na CCGL Tecnologia em Cruz Alta, RS.

8.2 MATERIAL E MÉTODOS

A caracterização da área experimental e a metodologia utilizada na condução do experimento estão descritas no Capítulo 4.

O aporte de carbono ao solo pelos resíduos vegetais foi determinado com base na quantificação da biomassa vegetal das plantas de cobertura secas à 65°C ou no índice de colheita das culturas de grãos, considerando-se um teor de carbono na biomassa de 40% (BAYER et al., 2006). O solo foi amostrado em novembro de 2007 para determinação de sua densidade com anéis volumétricos (EMBRAPA, 2011) e teores de carbono orgânico e nitrogênio total por combustão seca (Flash EA 1200, Thermo Finnigan, Estados Unidos). Foram coletadas quatro amostras por parcela nas camadas de 0-5, 5-15, 15-30, 30-45, 45-60 e 60-100 cm de profundidade do solo. Para determinação dos teores de carbono e nitrogênio, as amostras foram secas ao ar e peneiradas a dois mm. Os resíduos vegetais foram removidos e as amostras foram finamente moídas para análise. Para determinação da densidade do solo, as amostras foram secas nos anéis à 105°C até peso constante. Os estoques de carbono e nitrogênio do solo foram determinados com base na massa de solo e teor de carbono e nitrogênio no solo de cada camada. Os resultados foram então comparados em massas equivalentes de solo (WENDT, HAUSER, 2013).

Também foram coletadas amostras da camada 0-5 cm do solo para análise da estabilidade de agregados em água e o teor de carbono e nitrogênio associado às diferentes classes de agregados de solo. Para tanto, utilizou-se o método de Yoder com modificações propostas por Mikha e Rice (2004) para fracionamento de agregados nas classes de tamanho <53 , 53-250, 250-2.000, e $>2.000 \mu\text{m}$. Estas classes de agregados foram denominadas fração silte+argila, microagregados, macroagregados e grandes macroagregados, respectivamente. Subamostras de cada classe de agregados foram analisadas quanto aos seus teores de carbono e nitrogênio, descontando-se o teor de areia em cada fração de agregados. Os resultados foram submetidos à análise de variância (Two-way ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. A relação entre variáveis foi determinada pela significância do coeficiente de determinação através de análise de regressão. Os resultados foram considerados significativos com $P < 0,05$.

8.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de manejo do solo e de rotação de culturas impactaram o aporte médio de carbono ao solo por resíduos vegetais no período 1985-2007 (Tabela 1). Considerando o sistema de sucessão soja/trigo (R0), o aporte de carbono no Sistema Plantio Direto foi 9% maior do que com preparo convencional, devido a maior produtividade de soja e trigo no sistema conservacionista. A rotação de culturas de inverno (R1) promoveu aporte médio de carbono ao solo, 25-35% maior do que R0, principalmente devido ao maior aporte de resíduos ao solo pela cultura da aveia preta. No entanto, a rotação anual do trigo com a aveia preta também melhorou em 40-50% a produtividade e o aporte de carbono pelo trigo, devido a menor ocorrência de doenças nesta cultura. Conforme esperado, a inclusão da ervilhaca, mas principalmente do nabo forrageiro e do milho, no sistema de culturas, aumentou significativamente o aporte de carbono ao solo no sistema R2. Este aumento foi mais pronunciado no Sistema Plantio Direto do que no preparo convencional, que tiveram aportes de carbono 55% e 48% maiores do que com o sistema R0, respectivamente. Destaca-se também que a inclusão da ervilhaca e nabo forrageiro no sistema R2 aumentou a disponibilidade de nutrientes no solo devido à fixação biológica de nitrogênio e reciclagem de nitrogênio e potássio, respectivamente, com impactos positivos na produtividade das culturas em sucessão (ACOSTA et al., 2011; NICOLOSO et al., 2008).

Tabela 1 – Aporte médio anual de carbono ao solo (1985-2007) por sistemas de culturas sob preparo convencional e plantio direto.

Cultura	Preparo convencional (PC)			Plantio direto (PD)		
	R0	R1	R2	R0	R1	R2
	Mg C ha⁻¹ ano⁻¹					
Soja	2,36	2,87	2,53	2,57	2,57	2,90
Trigo	1,23	1,73	1,43	1,34	2,00	1,58
Aveia preta	-	2,21	2,12	-	2,63	2,46
Milho	-	-	3,84	-	-	4,68
Aveia preta/ Ervilhaca	-	-	2,61	-	-	2,94
Nabo forrageiro	-	-	1,51	-	-	1,51
Total	3,59	4,84	5,31	3,91	4,88	6,05

R0: soja/trigo, R1: soja/trigo/soja/aveia, R2: soja/aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo/trigo.

O efeito dos sistemas de manejo do solo e rotação de culturas sobre os estoques de carbono e nitrogênio total do solo pode ser observado na Figura 1. Não houve diferenças significativas nos estoques de carbono e nitrogênio total entre os diferentes sistemas de culturas com preparo convencional para nenhuma das camadas de solo avaliadas (Fig. 1A/B). Observa-se, no entanto, que a incorporação dos resíduos vegetais ao solo pelas operações de aração e gradagem aumentou os estoques de carbono e nitrogênio na camada 5-15 cm em relação à camada superficial (0-5 cm) do solo sob preparo convencional (FRANZLUEBBERS, 2002). De qualquer maneira, este efeito observado na camada 5-15 cm não foi suficiente para compensar o acúmulo de carbono e nitrogênio na camada superficial do solo com Sistema Plantio Direto (Fig. 1C/D).

Neste caso, o aumento do aporte de carbono e nitrogênio com o aumento da intensidade de rotação de culturas afetou positivamente os estoques de carbono e nitrogênio do solo. Verificou-se ainda que, com os sistemas de rotação R1 e R2, houve incrementos nos estoques de carbono e nitrogênio também na camada 15-30 cm de profundidade do solo. Este resultado pode ser atribuído ao melhor desenvolvimento do sistema radicular das culturas de cobertura do solo, que contribuíram com aporte direto de carbono para esta camada de solo. De qualquer maneira, não houve diferenças significativas entre os estoques de carbono e nitrogênio do solo entre nenhum dos tratamentos para as camadas 30-60 cm e 60-100 cm de profundidade. No entanto, sabe-se que os aportes de carbono e nitrogênio via sistema radicular nas camadas mais profundas de solo (>30 cm) são pequenos, porém, no longo prazo, podem promover incrementos nos estoques de matéria orgânica do solo. Assim, destaca-se a importância da manutenção dos experimentos de longa duração a fim de que a dinâmica da matéria orgânica nas camadas superficiais e mais profundas do solo possa ser avaliada no longo prazo (> 30 anos).

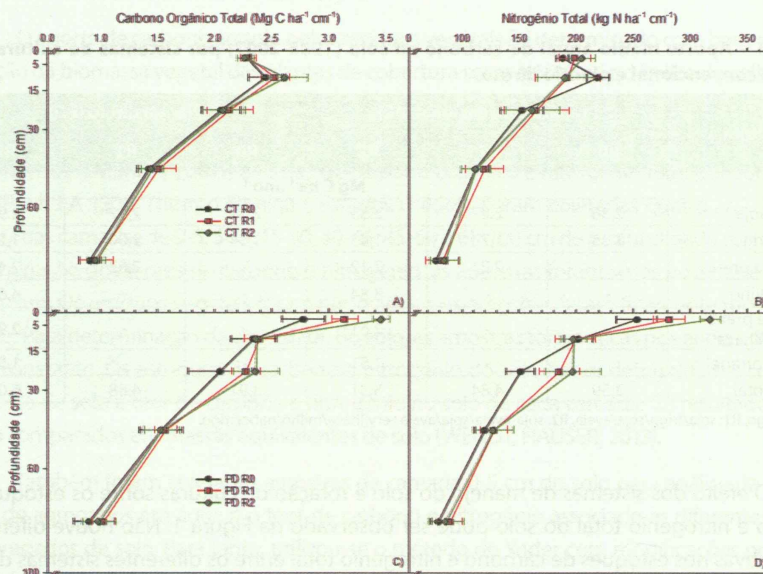


Figura 1 – Estoques de carbono orgânico (A,C) e nitrogênio total (B,D) no perfil de um latossolo após 22 anos de rotação de culturas sob preparo convencional (A,B) e plantio direto (C,D). PC: preparo convencional, PD: plantio direto. R0: soja/trigo, R1: soja/trigo/soja/aveia, R2: soja/aveia/soja/aveia+ervilha/milho/nabo/trigo.

Os estoques de carbono e nitrogênio no solo nas camadas 0-30 cm e 0-100 cm de profundidade são reportados na Figura 2. No solo com preparo convencional, não houve diferenças significativas entre os estoques de carbono e nitrogênio do solo para nenhuma das camadas avaliadas nos diferentes sistemas de rotação de culturas. Verificou-se, portanto, que o aumento da taxa de mineralização da matéria orgânica do solo com preparo intensivo compensou o maior aporte de carbono e nitrogênio com o aumento da intensidade de rotação de culturas. No solo com Sistema Plantio Direto, o aumento da rotação de culturas provocou aumento linear dos estoques de carbono e nitrogênio na camada 0-30 cm, enquanto que na camada 0-100 cm, não houve diferenças entre as rotações R1 e R2 que, por sua vez, tiveram estoques de carbono e nitrogênio maiores que R0. Estes resultados demonstram que o acúmulo de carbono e nitrogênio registrado na superfície do solo devido ao aumento da intensidade de rotação de culturas e ao uso do Sistema Plantio Direto (+8.3 mg C ha⁻¹ e +1 mg N ha⁻¹ na comparação entre R2 e R0) foi mantido no perfil do solo (+11.5 mg C ha⁻¹ e +1.3 mg N ha⁻¹, respectivamente).

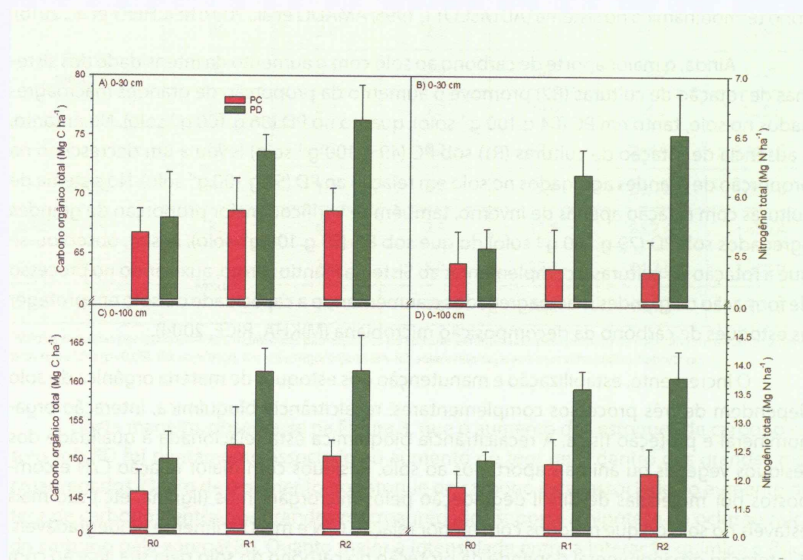


Figura 2 – Estoques de carbono orgânico (A,C) e nitrogênio total (B,D) nas camadas de 0-30 cm (A,B) e 0-100 cm (C,D) de um latossolo após 22 anos de rotação de culturas sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). R0: soja/trigo, R1:soja/trigo/soja/aveia, R2: soja/aveia/soja/aveia+ervilha/milho/nabo/trigo.

A distribuição de classes e o diâmetro médio geométrico dos agregados foram afetados pelo manejo de solo e culturas (Tabela 2). O PD demonstrou maior capacidade em formar grandes macroagregados ($>2.000 \mu\text{m}$) em relação ao PC, o qual apresentou maior quantidade de agregados de menor tamanho ($240\text{-}2.000 \mu\text{m}$). A formação de grandes macroagregados se dá por processo evolutivo, que engloba fatores físicos, químicos e biológicos do solo. Primeiro, é preciso que ocorra a aproximação das partículas do solo pela flocculação da argila. Para que se formem aglomerados de solo, é necessária a ação de agentes cimentantes, como a matéria orgânica e os óxidos de ferro e alumínio. À vista disso, os agregados do solo se unem pelos mesmos processos e formam os micros e macroagregados do solo. Esse processo evolutivo ocorre até a formação dos grandes macroagregados, principalmente pela ação das hifas de fungos, pelos radiculares e raízes. Desta forma, a formação de grandes macroagregados depende de sistemas que proporcionem aportes continuados de biomassa vegetal diversificada e abundante por longo prazo. Então, são dois os fatores necessários para a formação de grandes macroagregados no solo: a formação hierárquica dos agregados propriamente dita e a estabilização desses agregados. Nesse caso, a estabilização dos agregados é fortemente dependente da não mobilização do solo, processo esse que diminui a entropia e promove equilíbrio termodinâmico no sistema (ADDISCOTT, 1995; AMADO et al., 2007; REICHERT et al., 2016).

Ainda, o maior aporte de carbono ao solo com o aumento da intensidade dos sistemas de rotação de culturas (R2) promove o aumento da proporção de grandes macroagregados no solo, tanto em PC ($84 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$), quanto no PD ($86 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$). No entanto, a ausência de rotação de culturas (R1) sob PC ($49 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$) levou a um decréscimo na proporção de grandes agregados no solo em relação ao PD ($57 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$). No sistema de culturas com rotação apenas de inverno, também se verificou maior proporção de grandes agregados sob PD ($79 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$) do que sob PC ($59 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$). Assim, observou-se que a rotação de culturas é complementar ao Sistema Plantio Direto, auxiliando no processo de formação de grandes macroagregados e aumentando a capacidade do solo em proteger os estoques de carbono da decomposição microbiana (MIKHA, RICE, 2004).

O incremento, estabilização e manutenção dos estoques de matéria orgânica do solo dependem de três processos complementares: recalcitrância bioquímica, interação organomineral e proteção física. A recalcitrância bioquímica está relacionada à qualidade dos resíduos vegetais ou animais aportados ao solo. Resíduos com maior relação C/N e compostos por moléculas de difícil degradação pelos microrganismos (lignina, etc.) são mais estáveis no solo do que resíduos com menor relação C/N e mais facilmente biodegradáveis. A interação organomineral depende da proteção do carbono do solo pela sua ligação com os argilominerais do solo que limitam o acesso dos microrganismos a este substrato. Este mecanismo, portanto, está fortemente ligado a granulometria e mineralogia do solo.

Finalmente, a proteção física se deve à oclusão do carbono dentro de agregados no solo, que também limitam o acesso dos microrganismos do solo evitando a decomposição do resíduo. Verifica-se, então, que o aumento da proporção de grandes macroagregados no solo é o único mecanismo manejável a fim de se promover o acúmulo de carbono do solo.

Tabela 2 – Distribuição de classes e diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água na camada 0-5 cm de um latossolo após 22 anos de rotação de culturas sob preparo convencional e plantio direto.

Preparo de solo	Rotação	Classe de agregados estáveis em água				DMG
		<53	53-250	250-2.000	>2.000	
g 100 g⁻¹ solo						µm
Preparo convencional PC	R0	2,3	7,4	41,4	48,9	1.011
	R1	1,7	5,2	33,4	59,7	1.184
	R2	0,8	2,4	12,7	84,2	1.609
Plantio direto PD	R0	2,0	7,1	34,2	56,7	1.089
	R1	0,9	2,9	16,7	79,6	1.525
	R2	0,7	2,2	10,9	86,2	1.651
Média	R0	2,2	7,2	37,8	52,8 C1	1.050 C
	R1	1,2	4,1	25,0	69,7 B	1.355 B
	R2	0,7	2,3	11,8	85,2 A	1.630 A
PC	Média	1,6	5,0	29,2	64,2 b	1.268 b
PD		1,2	4,0	20,6	74,1 a	1.421 a

¹Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas para sistemas de culturas e minúsculas para preparo de solo, diferem estatisticamente pelo teste LSD ($p < 0,05$). R0: soja/trigo, R1: soja/trigo/soja/aveia, R2: soja/aveia/soja/aveia+ervilha/milho/nabo/trigo.

Desta maneira, observa-se na Figura 3, que o aumento dos estoques de carbono no solo sob PD foi diretamente associado ao aumento do teor de C dentro dos grandes macroagregados. O fato de o aumento no estoque de carbono estar associado ao aumento do teor de carbono dentro dos grandes macroagregados suporta a hipótese da oclusão física do carbono pela agregação. Quanto maior a intensidade entre a interação química e física de proteção e estabilização, maior é a possibilidade de formação de agregados estáveis, os quais protegem fisicamente os compostos orgânicos, como o carbono. Ainda, os grandes macroagregados apresentaram maior teor de carbono em relação aos agregados menores (MIKHA, RICE, 2004).

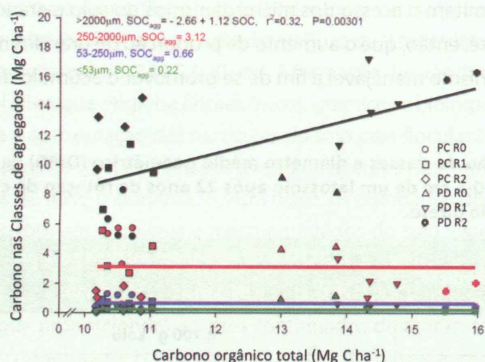


Figura 3 – Relação entre os estoques de carbono orgânico total do solo e o carbono orgânico armazenado nas diferentes classes de tamanhos de agregados estáveis em água (<53, 53-250, 250-2.000 e >2.000 µm) na camada 0-5 cm de um latossolo após 22 anos de rotação de culturas sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). R0: soja/trigo, R1: soja/trigo/soja/aveia, R2: soja/aveia/soja/aveia+ervilha/milho/nabo/trigo.

Estes resultados fortalecem a ideia de que o aumento do estoque e a estabilização do carbono dependem de um processo evolutivo e de retroalimentação. Basicamente, a formação dos grandes macroagregados decorre do aporte contínuo de carbono via biomassa vegetal. Já a estabilização, depende de um PD contínuo com o mínimo revolvimento e cobertura permanente do solo. Assim, conclui-se que a continuidade do manejo do solo sob PD é requisito básico à manutenção dos estoques de matéria orgânica no solo. Ainda, o sistema PD deve ser necessariamente associado à rotação de culturas com alto aporte de resíduos vegetais ao solo de maneira a incrementar as taxas de acúmulo de carbono e nitrogênio no solo.

8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a adoção do Sistema Plantio Direto, com mínima mobilização do solo e manutenção de cobertura vegetal na superfície do solo, aumentou os estoques de carbono e nitrogênio na camada mais superficial (0-5 cm) em comparação ao solo manejado com preparo convencional. No entanto, o aumento da diversidade de espécies e do aporte de carbono com o uso de rotação de culturas promoveu, após 22 anos, acúmulo de carbono e nitrogênio também em maior profundidade (0-30 cm). Ainda, o acúmulo de carbono na camada 0-30 cm se manteve significativo quando o solo foi amostrado até um metro de profundidade, indicando que não houve perdas de carbono nas camadas mais profundas de solo.

O aumento da quantidade de grandes macroagregados de solo (>2 mm) e a maior concentração de carbono no interior destes agregados indicaram que a proteção física da matéria orgânica do solo foi o principal mecanismo responsável pelo acúmulo de carbono no solo com Sistema Plantio Direto. Desta maneira, a manutenção do Sistema Plantio Direto é fundamental para a permanência do carbono acumulado nas camadas mais superficiais do solo no longo prazo, visto que o provável rompimento destes agregados através do preparo do solo poderia expor esta fração do carbono à atividade microbiana.

Os resultados expostos neste e demais capítulos demonstram que a manutenção dos experimentos de longa duração, tal qual o ensaio de sistemas de preparo de solo e rotação de culturas, conduzido na FUNDACEP FECOTRIGO em Cruz Alta (RS), desde 1985 até os dias atuais, é fundamental para a avaliação das mudanças nos estoques de matéria orgânica do solo que ocorrem no longo prazo, especialmente nas camadas mais profundas de solo. Experimentos deste tipo são raros no Brasil e relativamente recentes se comparados com outros estudos conduzidos há mais de 100 anos, por exemplo, nos Estados Unidos (The Morrow Plots, 1876; The Magruder Plots, 1982; The Old Rotation, 1896) e Inglaterra (Broadbalk Experiment, 1843; Hosfield Experiment, 1852), entre outros, com inúmeras contribuições significativas para as ciências agrárias. Apesar de mais recentes, como este em Cruz Alta, RS, fornecem informações únicas sobre os impactos das práticas de manejo e rotação de culturas em solos tropicais, que têm características radicalmente distintas dos solos de regiões agrícolas de clima temperado.

8.5 REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J.A.A. et al. Effect of 15n-labeled hairy vetch and nitrogen fertilization on maize nutrition and yield under no-tillage. Contribuição da ervilhaca marcada com 15n e da adubação nitrogenada na nutrição e produtividade do milho no Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1337-1345, 2011.
- ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**. 46: 161-168, 1995.
- AMADO, T.J.C. et al. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**. 35:1599-1607, 2007.
- BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, v. 91, n. 1-2, p. 217-226, 2006.
- BLANCO-CANQUI, H. et al. No-till Induced Increase in Organic Carbon Reduces Maximum Bulk Density of Soils. **Soil Science Society of America Journal**. 73: 1871-1879, 2009.
- CALEGARI, A. et al. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an oxisol: A model for sustainability. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 4, p. 1013-1019, 2008.
- CAMPOS, B.C. et al. Long-term C-CO₂ emissions and carbon crop residue mineralization in an oxisol under different tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 819-832, 2011.
- FERREIRA, A. de O. et al. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 65-74, 2013.
- NICOLOSO, R.S. et al. Efficiency of mechanical and biological chiseling in the improvement of physical attributes of a heavy clay oxisol and the increment of soybean yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2011. [s.l.: s.n.].
- FRANZLUEBBERS, A. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 95-106, jul. 2002.
- JAT, R.A. et al. Conservation agriculture for sustainable and resilient agriculture: global status, prospects and challenges. **Conservation Agriculture: Global Prospects and Challenges**, n. October, p. 1-25, 2014.
- LAL, R. Depletion and Restoration of Carbon in the Pedosphere. **Japanese Society of Pedology**, v. 53, n. 3, p. 19-32, 2010.
- MIKHA, M. M.; RICE, C. W. Tillage and Manure Effects on Soil and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 3, p. 809, 2004.
- NICOLOSO, R.S. et al. Soil organic carbon budget under crop-livestock integration in southern Brazil. **Rev. Bras. de Ci. do Solo**, 2008.
- PITTELKOW, C.M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, 517: 367-371, 2015.

REICHERT, J.M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**, 158: 123-136, 2016.

REICHERT, J.M. et al. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandzation/desertification process. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 233: 370-380, 2016a.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, p. 201706103, 2017.

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology & Biochemistry**. 68: A4-A9, 2014.

SMITH, P.; MARTINO, D. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 789-813, 27 fev. 2008.

VIEIRA, F.C.B. et al. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1699, 2009.

WENDT, J.W.; HAUSER, S. An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. **European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 1, p. 58-65, 2013.

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, n. 6, p. 1930, 2002.

ZOTARELLI, L. et al. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, v. 132, p. 185-195, 2012.