



Effects of land use systems on total organic carbon and carbon in the oxidizable fractions of soil organic matter¹

Efeitos dos sistemas de uso do solo sobre o carbono orgânico total e carbono nas frações oxidáveis da matéria orgânica do solo

Simone Cândido Ensinas Maekawa*^{ID}²; Luana Larissa de Souza Amorim^{ID}²; Giovanna Stephanie Beluque Gonçalves^{ID}²; Diego Menani Heid^{ID}³

Abstract: Adopting conservationist land use systems can contribute to soil carbon storage and minimize climate change. Given the above, the research aimed to quantify and compare the contents of total organic carbon (TOC) and oxidizable fractions of soil organic matter (SOM) in different land use systems. The research was conducted in soils classified as Latossolo Vermelho Distroférico; soil samples were collected in the 0-0.10, 0.10-0.20, and -0.20-0.30 m soil layers. The treatments consisted of five land use systems (soybean/corn succession in a no-till system, cassava in conventional tillage, eucalyptus, permanent pasture, and reformed pasture) plus a reference area (native cerrado vegetation). The adoption of the no-till system was efficient in promoting greater increases in TOC contents, on the other hand, conventional tillage presented the lowest TOC contents throughout the soil profile (0-30 cm) studied. No-till system promoted the best benefits in increasing carbon in the F1 (labile), F2 (moderately labile), and F3 (recalcitrant) fractions of SOM. Determining carbon in the oxidizable fractions of SOM proved sensitive for evaluating changes caused by land use systems. Adopting the no-till system contributes consistently to increasing TOC contents, helping to mitigate greenhouse gas emissions and promoting improved soil quality.

Key words: Soil Sustainability. Carbon Liability. No-Tillage.

Resumo: A adoção de sistemas de uso do solo conservacionistas pode contribuir para o armazenamento de carbono nos solos e minimizar as mudanças climáticas. Diante do exposto, o objetivo da pesquisa foi quantificar e comparar os teores de carbono orgânico total (COT) e frações oxidáveis da matéria orgânica do solo (MOS) em diferentes sistemas de uso do solo. A pesquisa foi desenvolvida em solos classificados como Latossolos Vermelhos Distroféricos, sendo coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e -0,20-0,30 m. Os tratamentos consistiram de cinco diferentes sistemas de uso do solo (sucessão soja/milho em plantio direto, mandioca em plantio convencional, eucalipto, pastagem permanente e pastagem reformada) mais área de referência (vegetação nativa de cerrado). A adoção do plantio direto foi eficiente em promover maiores incrementos nos teores de COT, em contrapartida, o plantio convencional apresentou os menores teores de COT ao longo do perfil do solo estudado (0-30 cm). O plantio direto promoveu os melhores benefícios no incremento do carbono nas frações F1 (lábil), F2 (moderadamente lábil) e F3 (recalcitrante) da MOS. A determinação do carbono nas frações oxidáveis da MOS se mostrou sensível para avaliar as alterações causadas pelos sistemas de uso do solo. A adoção do plantio direto contribuiu consistentemente para aumentar os teores de COT, auxiliando na mitigação dos gases do efeito estufa e na promoção da melhoria da qualidade do solo.

Palavras-chave: Sustentabilidade do Solo. Labilidade do Carbono. Plantio Direto.

*Corresponding author

¹ Text from a research Project

² Mato Grosso do Sul State University, Naviraí Unit. Address: 275 Emílio Mascoli Street, Zip Code:79950-000, Naviraí, MS, Brazil. E-mails: simone-ensinas@uems.br; luanalarissa141@gmail.com; giovannastephaniebeluque@gmail.com

³ Federal Institute of Mato Grosso do Sul, Naviraí Campus. Address: 203 Hilda Street, Boa Vista Housing Complex, Naviraí, MS, Brazil. E-mail: diego.heid@ifms.edu.br

INTRODUCTION

Climate change caused by increased greenhouse gas emissions is one of the most serious environmental problems faced today, which makes it a subject of constant debate on the international and national stage (STOCKMANN *et al.*, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 2018).

In Brazil, agribusiness plays an important role in regulating the emission of these gases between the soil and the atmosphere, as agriculture and livestock are responsible for 26.8% of emissions, and if indirect emissions from the deforestation of natural ecosystems for the expansion of the sector are added, emissions can reach 60% (AUBERTIN; JESUS, 2021).

In this context, the scientific literature has widely discussed the different forms of land use and their capacity to act as a source or sink of greenhouse gases. It is estimated that soil contains approximately 2344 billion tons of organic carbon, and understanding how this amount of carbon changes over time and with land use is extremely important, as the transfer of a small proportion of soil carbon to the atmosphere in the form of CO₂ can significantly impact the global climate (STOCKMANN *et al.*, 2013).

Studies show that replacing native vegetation with sustainable land use systems such as those involving no or minimal soil disturbance, crop rotation, crop diversification, integrated production systems, improved pastures, and cover crops, among others, can increase the carbon content in the soil and sequester carbon (CARNEIRO *et al.*, 2009; GUARESCHI *et al.*, 2013; GALEGO *et al.*, 2022).

The no-till system is considered a conservation practice that can contribute to an increase in the stock of carbon and nitrogen in the topsoil and also in-depth, depending on how long the system is adopted. Vasconcelos *et al.* (2018) found that the no-till system reduced greenhouse gas emissions, and in comparison with conventional tillage, they were 3% lower, taking into account that 25 million hectares are cultivated in the no-till system in Brazil, the reduction in greenhouse gas emissions would reach 1.4 million tons of C-*eq* per year.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas causadas pelo aumento das emissões de gases do efeito estufa são um dos problemas ambientais mais sérios enfrentados atualmente, o que faz dele tema de constante debate no cenário internacional e nacional (STOCKMANN *et al.*, 2013; VASCONCELOS *et al.*, 2018).

No Brasil, o agronegócio desempenha um importante papel na regulação da emissão desses gases entre os solos e a atmosfera, pois a agricultura e a pecuária são responsáveis por 26,8% das emissões, se forem acrescentadas as emissões indiretas provenientes do desmatamento dos ecossistemas naturais para a expansão do setor, as emissões podem chegar a 60% (AUBERTIN; JESUS, 2021).

Neste contexto, as diferentes formas de usos do solo e sua capacidade de atuar como fonte ou dreno dos gases de efeito estufa tem sido amplamente discutidas na literatura científica. Estima-se que o solo contém aproximadamente 2344 bilhões de toneladas de carbono orgânico, e entender como essa quantidade de carbono muda com o tempo e com o uso do solo é de extrema importância, pois a transferência de uma pequena proporção do carbono do solo para a atmosfera na forma de CO₂ pode impactar significativamente o clima global (STOCKMANN *et al.*, 2013).

Estudos mostram que substituição da vegetação nativa para sistemas sustentáveis de uso do solo como os que envolvem o não revolvimento ou revolvimento mínimo do solo, rotação de culturas, diversificação de culturas, sistemas integrados de produção, pastagens melhoradas e adubos verdes, dentre outras, podem elevar o conteúdo de carbono no solo e sequestrar carbono (CARNEIRO *et al.*, 2009; GUARESCHI *et al.*, 2013; GALEGO *et al.*, 2022).

A utilização do sistema plantio direto é considerada uma prática conservacionista que pode contribuir no aumento do estoque de carbono e nitrogênio na camada superficial do solo e também em profundidade em função do tempo de adoção do sistema. Vasconcelos *et al.* (2018) verificaram que o plantio direto reduziu as emissões dos gases do efeito estufa, e na comparação com plantio convencional foram 3% menores, levando em consideração que 25 milhões de hectares são cultivados em plantio direto no Brasil, a redução das emissões de gases do efeito estufa chegaria a 1,4 milhões de toneladas de C-*eq* por ano.

Similarly, areas cultivated with trees and pastures can also contribute to a positive balance of organic carbon in the soil due to the ability of trees to store carbon in the form of biomass (BRIANEZI *et al.*, 2019; NANZER *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020), and pastures, when well managed, contribute to an increase in soil organic carbon (SANTOS *et al.*, 2021), due to the growth of the intense root system which, when decomposed, releases nutrients and also contributes to the accumulation of carbon in the subsurface (TROIAN *et al.*, 2020).

To indicate the changes resulting from the management employed, in regions with a hot and humid climate, such as those that predominate in Brazil, soil organic matter represents an important reserve of carbon in the soil, and the evaluation of the labile and recalcitrant fractions of SOM and how they are distributed in the soil profile can indicate changes resulting from anthropogenic practices (PINTO *et al.*, 2020).

With the chemical fractionation of the SOM using different degrees of oxidation through increasing amounts of sulfuric acid, three fractions (F1, F2, and F3) of the SOM are obtained, which are efficient in identifying quantitative and qualitative changes in the SOM associated with different forms of land use and management practices, since the F1 is a fraction with greater lability in the soil (RANGEL *et al.*, 2008), and is more sensitive to changes in land use, and the F3 fraction is more recalcitrant due to its association with clay particles, microaggregates and high degree of humification, while F2 is an intermediate fraction (BARRETO *et al.*, 2011; BUENO *et al.*, 2017; CHAN *et al.*, 2001; LOSS *et al.*, 2014).

Research that evaluates the capacity of land use systems to allocate organic carbon in the soil, especially in the state of Mato Grosso do Sul, is recent and extremely important. The State is undergoing strong agricultural expansion, located in the Central-West Region of Brazil, with extensive areas of flat topography, a tropical and subtropical climate favorable to agricultural cultivation with a prominent role in the production of soybeans, corn, sugarcane, cellulose, and beef (TETILA *et al.*, 2020). Studies along these lines can contribute to the reduction of carbon dioxide emissions from agricultural practices and the sustainability of the Cerrado biome.

De maneira semelhante, áreas cultivadas com árvores e pastagens também podem contribuir para um balanço positivo do carbono orgânico no solo, em função da capacidade das árvores armazenarem carbono na forma de biomassa (BRIANEZI *et al.*, 2019; NANZER *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020), e as pastagens quando bem manejadas contribuem para o aumento do carbono orgânico do solo (SANTOS *et al.*, 2021), em função do crescimento do sistema radicular intenso que, ao ser decomposto, libera nutrientes e contribui também para o acúmulo de carbono em subsuperfície (TROIAN *et al.*, 2020).

Para indicar as modificações decorrentes do manejo empregado, em regiões de clima quente e úmido, como as que predominam no Brasil, a matéria orgânica do solo representa importante reserva de carbono no solo, e a avaliação das frações lábeis e recalcitrantes da MOS e como se distribuem no perfil do solo podem indicar modificações decorrentes das práticas antrópicas (PINTO *et al.*, 2020).

Com o fracionamento químico da MOS utilizando diferentes graus de oxidação por meio de quantidades crescentes de ácido sulfúrico se obtêm três frações (F1, F2 e F3) da MOS que são eficientes em identificar alterações quantitativas e qualitativas na MOS associada às diferentes formas de uso do solo e práticas de manejo, visto que a F1 é uma fração de maior labilidade no solo (RANGEL *et al.*, 2008), e mais sensível às mudanças de uso do solo, e a fração F3 é mais recalcitrante devido à sua associação com partículas de argila, microagregados e alto grau de humificação, enquanto a F2 é uma fração intermediária (BARRETO *et al.*, 2011; BUENO *et al.*, 2017; CHAN *et al.*, 2001; LOSS *et al.*, 2014).

Pesquisas que avaliem a capacidade dos sistemas de uso do solo na alocação do carbono orgânico no solo, principalmente no estado de Mato Grosso do Sul são recentes e de extrema importância. O Estado se encontra em forte expansão agrícola, localizado na região Centro-Oeste do Brasil, com extensas áreas de topografia plana, clima tropical e subtropical favoráveis ao cultivo agrícola com papel de destaque na produção de soja, milho, cana-de-açúcar, celulose e carne bovina (TETILA *et al.*, 2020). Estudos nessa linha podem contribuir para a redução das emissões de dióxido de carbono oriundo das práticas agrícolas e para a sustentabilidade do bioma Cerrado.

This research aimed to quantify and compare total organic carbon and carbon levels in the oxidizable fractions of soil organic matter in different land use systems in the Naviraí region of Mato Grosso do Sul.

MATERIAL AND METHODS

The research was carried out in Naviraí, Mato Grosso do Sul, at 23°3'55'' S and 54°11'26''W, with an average altitude of 362 m, in soils classified according to SiBCS as Latossolo Vermelho Distroférico (SANTOS *et al.*, 2013), located in the Cerrado Biome with a climate according to Koppen (1948) classified as humid subtropical (Cwa-type) with hot summers and dry winters.

The treatments consisted of the following land use systems: No-till system (NT) - area cultivated with soybeans in summer and corn in winter for more than 10 years; no other practice was used to form mulch; the area was corrected and fertilized according to the nutritional requirements of the crop and without disturbing the soil. Conventional tillage (CT) - area cultivated with cassava in the initial phase under a conventional management system for more than five years, with correction and fertilization according to the crop needs; soil preparation used plowing and harrowing. Eucalyptus (EuC) - area cultivated with *Eucalyptus grandis* for more than 10 years and without soil disturbance, with correction and fertilization carried out at the beginning of planting according to the crop needs. Reformed pasture (RP) - area cultivated with *Cenchrus pupureus* for three years, with correction and management of soil fertility at the beginning of cultivation; previously, the area was occupied with degraded pasture of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Permanent Pasture (PP) - area with *Brachiaria brizantha* cv. Marandu with semi intensive grazing using 1.0 animal units (AU) per hectare per year for more than 20 years and without soil fertility correction and management. Reference area with Native Cerrado Vegetation (NV) - area of natural vegetation with cerrado tree species, characterized as a reserved area that was separated at a distance of 200 m from the other areas under study.

Diante do exposto, objetivou-se quantificar e comparar os teores de carbono orgânico total e carbono nas frações oxidáveis da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de uso do solo na região de Naviraí no Mato Grosso do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no município de Naviraí, Mato Grosso do Sul, localizada nas coordenadas geográficas 23°3'55'' S e 54°11'26''W, com altitude média de 362 m, em solos classificados segundo SiBCS como Latossolos Vermelhos Distroféricos (SANTOS *et al.*, 2013), localizados no Bioma de Cerrado com clima segundo Koppen (1948) classificado como subtropical úmido (Cwa) com verão quente e inverno seco.

Os tratamentos consistiram em sistemas de uso do solo, sendo: Plantio direto (PD) - área cultivada com soja no verão e milho no inverno por mais de 10 anos, não se utilizou outra prática para a formação de palhada, na área foi realizada correção e manejo da adubação de acordo com as exigências nutricionais da cultura e sem revolvimento do solo; Plantio convencional (PC) - área cultivada com mandioca em fase inicial em sistema convencional de manejo por mais de cinco anos, com correção e adubação de acordo com a necessidade da cultura, para preparo do solo foi utilizado aração e gradagem; Eucalipto (EuC) - área cultivada com *Eucalyptus grandis* por mais de 10 anos e sem revolvimento do solo, com correção e adubação realizada no início do plantio de acordo com a necessidade da cultura; Pastagem reformada (PR) - área cultivada com *Cenchrus pupureus* há três anos, com correção e manejo da fertilidade do solo no início do cultivo, anteriormente a área estava ocupada com pastagem degradada de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu; Pastagem permanente (PP) - área com *Brachiaria brizantha* cv. Marandu com pastejo semi-intensivo com utilização de 1,0 unidade animal (UA) por hectare ano por mais de 20 anos, e sem correção e manejo da fertilidade do solo; e área de referência Vegetação Nativa de Cerrado (VN) - área de vegetação natural com espécies arbóreas do cerrado, caracterizada como área de reserva que estava separada a uma distância de 200 m das outras áreas em estudo.

The soil samples were collected in a zig zag pattern in the 0-0.10, 0.10-0.20, and 0.20-0.30 m layers. Five single samples were taken with a Dutch auger from each treatment and soil layer to form the composite sample sent to the laboratory for analysis. After collection, the samples were crushed, dried in the shade, and passed through a 2 mm mesh sieve, then macerated and passed through a 0.210 mm mesh sieve to determine the total organic carbon content and the carbon content of the oxidizable fractions of the soil organic matter.

Total organic carbon (TOC) was quantified using the wet oxidation method described by Yeomans and Bremner (1988). The oxidizable carbon fractions were determined using the methodology of Chan *et al.* (2001), modified by Barreto *et al.* (2011), with which three fractions were obtained: F1, F2, and F3. The F1 fraction corresponded to the labile fraction of carbon, the F2 fraction to the moderately labile fraction, and the F3 fraction to the recalcitrant fraction of soil organic matter. Subsequently, using the results obtained for each fraction, the ratio between the F1/F3 fractions was calculated.

The experiment was analyzed in a completely randomized design, and the data were submitted for analysis of variance and the F test. The means of the treatments were compared using the Tukey test ($p \leq 0.05$). The SISVAR software (FERREIRA, 2000) was used for the analysis.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The total organic carbon (TOC) stock in the 0-0.10 m layer was highest in the area under NT but did not differ statistically from the NV and PP areas. The lowest value was found under CT and RP (Table 1).

Concerning TOC content in the 0.10-0.20 m layer, the CT also had the lowest content, at 5.91 g kg⁻¹, and the highest levels were found in the NV area (12.27 g kg⁻¹), NT (11.61 g kg⁻¹), PP (8.65 g kg⁻¹), and EuC (8.04 g kg⁻¹).

As amostras de solos foram coletadas em zig-zag nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Foram coletadas com trado holandês cinco amostras simples em cada tratamento e camada de solo para formar a amostra composta que foi enviada ao laboratório para análise. Após a coleta, as amostras foram destorroadas, secas à sombra e passadas em peneira de malha de 2 mm, em seguida foram maceradas e passadas em peneira de malha de 0,210 mm para determinação dos teores de carbono orgânico total e o carbono das frações oxidáveis da matéria orgânica do solo.

O carbono orgânico total (COT) foi quantificado pelo método de oxidação via úmida, segundo método descrito por Yeomans e Bremner (1988). As frações oxidáveis de carbono foram determinadas pela metodologia de Chan *et al.* (2001), modificada por Barreto *et al.* (2011), com a qual foram obtidas três frações: F1, F2 e F3. A fração F1 correspondeu à fração lábil de carbono, a fração F2 à fração moderadamente lábil e a F3 à fração recalcitrante da matéria orgânica do solo. Posteriormente, com resultados obtidos para cada fração, foi calculada a relação entre as frações F1/F3.

O experimento foi analisado em delineamento inteiramente casualizado, e todos os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando houve significância, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), utilizando-se o programa computacional SISVAR, Sistema para Análise de Variância (FERREIRA, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estoque de carbono orgânico total (COT) na camada de 0-0,10 m apresentou maior valor na área sob PD, porém não diferiu estatisticamente da área de VN e PP. Já o menor valor foi verificado na área sob PC e PR (Tabela 1).

Com relação aos teores de COT na camada de 0,10-0,20 m, o PC também apresentou o menor teor, com 5,91 g kg⁻¹, e os maiores teores foram verificados na área de VN (12,27 g kg⁻¹), PD (11,61 g kg⁻¹), PP (8,65 g kg⁻¹) e EuC (8,04 g kg⁻¹).

Table 1 - Total organic carbon content (g kg^{-1}) in the 0-0.10, 0.10-0.20, and 0.20-0.30 m layers in different land use systems. Naviraí MS, 2024

Tabela 1 - Teores de carbono orgânico total (g kg^{-1}) nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em diferentes sistemas de uso do solo. Naviraí-MS, 2024

Land Use System	TOC		
	g kg^{-1}		
	0-0.10 m	0.10-0.20 m	0.20-0.30 m
NT	14.46 a	11.61 ab	11.93 a
CT	6.78 c	5.91 c	5.42 c
EuC	9.18 bc	8.04 abc	7.59 bc
RP	7.30 c	7.67 bc	8.06 bc
PP	11.59 ab	8.65 abc	6.75 c
NV	14.35 a	12.27 a	9.92 ab
F test	15.081*	6.419*	13.779*
CV (%)	16.45	21.93	15.13

NT - No-till system; CT - Conventional Tillage; EuC - Eucalyptus; RP - Reformed Pasture; PP - Permanent Pasture; NV - Native Vegetation. Means followed by equal letters in the column do not differ according to the Tukey test ($p \leq 0.05$). By F test **significant at 1% probability, ^{ns}not significant.

PD – Plantio Direto; PC – Plantio Convencional; EuC – Eucalipto; PR – Pastagem Reformada; PP – Pastagem Permanente; VN – Vegetação Nativa. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Pelo Teste F **significativo a 1% de probabilidade, ^{ns}não significativo.

The benefits of the no-till system in promoting increases in TOC contents were also observed by Costa *et al.* (2004). According to the authors, not turning over the soil and adding crop residues to the soil surface in the no-till system triggers numerous physical, chemical, and biological processes that are strongly interrelated and generally synergistic with each other, such as the processes that lead to increased aggregate stability and organic matter stocks in the soil.

Nanzer *et al.* (2019) also observed similar results for carbon content in the 0-0.10 m layer, with the NV and PP areas of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu has values of 11.3 and 10.4 g kg^{-1} , which may be correlated in the case of NV to the absence of anthropogenic action, which provides a favorable environment for the maintenance of SOM due to the greater input of residues and little output of these same residues.

O benefício do PD em promover incrementos nos teores de COT também foram observados por Costa *et al.* (2004), segundo os autores o não revolvimento do solo e a adição dos resíduos das culturas na superfície do solo em plantio direto desencadeiam inúmeros processos físicos, químicos e biológicos fortemente inter-relacionados, geralmente sinérgicos entre si, como é o caso dos processos que levam ao aumento da estabilidade dos agregados e dos estoques de matéria orgânica no solo, e o maior carbono orgânico determina maior estabilidade de agregados, e esta, por sua vez, maior proteção física da matéria orgânica.

Nanzer *et al.* (2019) também observaram resultados semelhantes para os teores de carbono na camada de 0-0,10 m, sendo que a área de VN e PP de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu tiveram valores de 11,3 e 10,4 g kg^{-1} , o que pode estar correlacionado no caso da VN à ausência de ação antrópica, o que proporciona um ambiente favorável à manutenção da MOS, devido à maior entrada de resíduos e pouca saída desses mesmos resíduos.

In CT, tillage practices result in high soil disturbance, causing negative effects such as the rupture of soil aggregates, with exposure of previously physically protected SOM inside the aggregates leading to lower TOC levels (LOSS *et al.*, 2015).

In the deepest soil layer (0.20-0.30 m), the DP (11.93 g kg⁻¹) was statistically superior to the other land use systems (Table 1). The NT can gradually increase the SOM and promote the protection of the soil surface, while in the CT, the lower quantity of residues and reduction in carbon levels are due to the partial incorporation of crop remains with greater decomposition of the organic material (CARNEIRO *et al.*, 2009).

No PC, as práticas de revolvimento do solo resultam em alta perturbação do solo, causando efeitos negativos como a ruptura dos agregados do solo, com exposição MOS antes protegida fisicamente no interior dos agregados proporcionando menores teores de COT (LOSS *et al.*, 2015).

Na camada mais profunda do solo (0,20-0,30 m), o PD (11,93 g kg⁻¹) foi superior estatisticamente aos demais sistemas de uso do solo (Tabela 1). O PD tem a capacidade de incrementar gradativamente a MOS e promover a proteção da superfície do solo, já no PC, a menor quantidade de resíduos e redução nos teores de carbono devem-se à parcial incorporação dos restos culturais com maior decomposição do material orgânico (CARNEIRO *et al.*, 2009).

Table 2 - Carbon content in the F1, F2, and F3 fractions of soil organic matter and the ratio between the F1/F3 fractions in the 0-0.10, 0.10-0.20, and 0.20-0.30 m layers in different land use systems. Naviraí MS, 2024

Tabela 2 - Teores de carbono nas frações F1, F2 e F3 da matéria orgânica do solo e relação entre as frações F1/F3 nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em diferentes sistemas de uso do solo. Naviraí-MS, 2024

Systems	g kg ⁻¹				Systems	g kg ⁻¹			
	F1	F2	F3	F1/F3		F1	F2	F3	F1/F3
0-0.10 m					0.10-0.20 m				
NT	7.33 a	2.73	4.42 a	1.65	NT	5.29 ab	4.08 a	2.25	2.35
CT	1.69 c	2.76	2.34 ab	0.73	CT	1.57 c	2.67 ab	1.64	0.96
EuC	4.92 b	3.11	1.15 b	4.27	EuC	3.64 b	2.96 ab	1.42	2.56
RP	4.01 b	2.04	1.18 b	3.39	RP	4.87 ab	1.14 b	1.65	2.95
PP	4.95 b	4.11	2.53 ab	1.95	PP	3.89 b	3.26 ab	1.48	2.62
NV	7.72 a	1.78	4.85 a	1.59	NV	6.64 a	1.69 ab	4.20	1.58
F test	18.913*	1.553 ^{ns}	6.358*	-	F test	13.550*	3.870*	2.454 ^{ns}	-
CV (%)	19.91	48.34	45.56	-	CV (%)	20.97	41.19	44.35	-
0.20-0.30 m					0.20-0.30 m				
NT	4.35	6.10 a	1.47	2.95					
CT	2.92	1.26 b	1.23	2.37					
EuC	3.13	2.05 b	2.41	1.29					
RP	4.57	2.76 b	0.73	6.26					
PP	2.33	3.80 ab	0.62	3.76					
NV	5.27	3.57 ab	1.09	4.83					
F test	2.684 ^{ns}	7.715*	1.005 ^{ns}	-					
CV (%)	36.78	37.18	60.13	-					

NT - No-till system; CT - Conventional Tillage; EuC - Eucalyptus; RP - Reformed Pasture; PP - Permanent Pasture; NV - Native Vegetation. Means followed by equal letters in the column do not differ according to the Tukey test ($p \leq 0.05$). By F test **significant at 1% probability, ^{ns}not significant.

PD – Plantio Direto; PC –Plantio Convencional; EuC – Eucalipto; PR – Pastagem Reformada; PP –Pastagem Permanente; VN – Vegetação Nativa. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Pelo Teste F **significativo a 1% de probabilidade, ^{ns}não significativo.

Concerning the F1 fraction of SOM, the NT area was statistically superior to the other use systems in the 0-10 m layer and did not differ statistically from the reference area (Table 2).

Concerning the F1 fraction in the 0.10-0.20 m layer, the NT was superior to the other land use systems but did not differ statistically from the RP and NV areas. For the 0.20-0.30 m layer, there were no significant differences between the systems evaluated for carbon in the F1 fraction (Table 2).

The labile fraction represents the F1 fraction of SOM; normally, the highest levels of carbon in this fraction are found in areas where there is a greater input of organic matter via plant residues (RANGEL *et al.*, 2008). Batista *et al.* (2014) also found the highest values of the F1 fraction in the surface layer due to the greater deposition of organic matter on the surface. This explains the higher contents found in the no-till system since, in this system, the non-rotation of the soil associated with the greater input of organic material results in greater maintenance of SOM.

The NV area also contributes to maintaining the carbon content in the F1 fraction due to the constant deposition of plant residues through the falling leaves of the trees and the absence of anthropogenic interference. In a study carried out by Oliveira *et al.* (2018), the area of native cerrado vegetation showed the highest carbon values in the F1 fraction in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m layers, with contents of 5.47 g kg⁻¹ and 5.10 g kg⁻¹, respectively, and, according to the authors, these results are related to the higher inputs of organic residues, as evidenced by the higher labile carbon contents up to 0.20 m depth.

The carbon content in the F2 fraction of soil organic matter showed no significant differences between the treatments for the 0-0.10 m layer. For the 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m layers, the NT showed the highest values with 4.08 g kg⁻¹ and 6.10 g kg⁻¹, respectively, differing from the RP in the 0.10-0.20 m layer and CT, EuC, RP in the 0.20-0.30 m layer (Table 2).

Com relação à fração F1 da MOS, a área de PD foi superior estatisticamente em relação aos demais sistemas de uso na camada de 0-10 m, e não diferiu estatisticamente da área de referência (Tabela 2).

Na camada de 0,10-0,20 m, o PD também apresentou superioridade em relação aos demais sistemas de uso do solo, porém não se diferenciou estatisticamente da área de PR e VN. Para a camada de 0,20-0,30 m, não houve diferenças significativas entre os sistemas avaliados para o carbono na fração F1 (Tabela 2).

A fração F1 da MOS é representada pela fração lábil e normalmente os maiores teores de carbono nesta fração são encontrados naquelas áreas onde há maior aporte de matéria orgânica via resíduos vegetais (RANGEL *et al.*, 2008). Batista *et al.* (2014) também verificaram os maiores valores da fração F1 na camada superficial em decorrência da maior deposição de matéria orgânica na superfície. O que explica os maiores teores verificados na área de plantio direto, uma vez que, neste sistema o não-revolvimento do solo associado à maior entrada de material orgânico resulta em maior manutenção da MOS.

A área de VN, também contribuiu para manutenção dos teores de carbono na fração F1 em decorrência da deposição constante de resíduos vegetais, por meio da queda das folhas das árvores e ausência de interferência antrópica. Em trabalho realizado por Oliveira *et al.* (2018), a área de vegetação nativa de cerrado apresentou os maiores valores de carbono na fração F1 na camada de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, com teores de 5,47 e 5,10 g kg⁻¹, respectivamente, e, segundo os autores, tais resultados estão relacionados às maiores entradas de resíduos orgânicos, constatado pelos maiores teores de carbono lábil até 0,20 m de profundidade.

Os teores de carbono na fração F2 da matéria orgânica do solo não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos para a camada de 0-0,10 m. E para a camada de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, o PD apresentou os maiores valores com 4,08 e 6,10 g kg⁻¹, respectivamente, diferindo em relação ao PR na camada de 0,10-0,20 m e PC, EuC, PR na camada de 0,20-0,30 m (Tabela 2).

A study by Melo *et al.* (2016) found that adopting the no-till system improves soil quality compared to conventional tillage and can provide values similar to those observed in the area under native Cerrado vegetation for the carbon contents in the oxidizable fractions. According to the authors, this is because the no-till system and the accumulation of plant residues in the no-till system, unlike conventional tillage, increases the degradation of organic carbon, especially that which is easy to oxidize. Guareschi *et al.* (2013) observed an increase in the F1 and F2 fractions in the no-till system and native cerrado due to the constant input of plant residues in different quantities and qualities on the soil surface, which over time causes changes in the content and quality of soil organic matter.

For the F3 fraction of SOM, there were statistical differences between the land use systems only in the 0-0.10 m layer, with NT (4.42 g kg⁻¹) and NV (4.85 g kg⁻¹) again being superior, differing from the EuC and RP areas (Table 1).

The F3 fraction refers to the most stable organic compounds in the soil, and the accumulation of carbon in F3 in these systems shows, once again, that they are capable of maintaining and storing carbon in more resistant fractions (BUENO *et al.*, 2017; LOSS *et al.*, 2014).

Concerning the ratio between the F1/F3 fractions, values >1 indicate a predominance of labile fractions, and values <1 indicate a predominance of recalcitrant fractions (BUENO *et al.*, 2017). In the land use systems evaluated, higher carbon contents can be seen in the more labile fractions of the SOM, except for the CT, which showed values lower than 1 in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m layers due to the lower addition of carbon in the F1 of the SOM (Table 2).

Em estudo realizado por Melo *et al.* (2016), foi constatado que a adoção do sistema plantio direto melhora a qualidade do solo em relação ao plantio convencional e é capaz de proporcionar valores semelhantes aos observados na área sob cerrado nativa para os teores de carbono nas frações oxidáveis. O que segundo os autores é decorrente do não revolvimento do solo e do acúmulo de resíduos vegetais no plantio direto, ao contrário do plantio convencional, o revolvimento do solo aumenta a degradação do carbono orgânica, principalmente, aquele de fácil oxidação. Guareschi *et al.* (2013) observaram aumento das frações F1 e F2 no plantio direto e cerrado nativo em função do constante aporte de resíduos vegetais em diferentes quantidades e qualidades na superfície do solo, que faz com que com o passar do tempo provoque modificações no conteúdo e na qualidade da matéria orgânica do solo.

Para a fração F3 da MOS houve diferenças estatísticas entre os sistemas de uso do solo apenas na camada de 0-0,10 m, com superioridade novamente do PD (4,42 g kg⁻¹) e VN (4,85 g kg⁻¹), diferindo da área de EuC e PR (Tabela 1).

A fração F3 refere-se aos compostos orgânicos de maior estabilidade no solo, e o acúmulo de carbono na F3 nestes sistemas mostram, mais uma vez, que são capazes de manter e estocar carbono em frações mais resistentes (BUENO *et al.*, 2017; LOSS *et al.*, 2014).

No que se refere à relação entre as frações F1/F3, valores >1 indicam predomínio de frações lábeis e valores <1 indicam predomínio de frações recalcitrantes (BUENO *et al.*, 2017). Nos sistemas de uso do solo avaliados, pode-se observar maiores teores de carbono nas frações mais lábeis da MOS, com exceção do PC que apresentou valores menores que 1 na camada de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, em função da menor adição de carbono na F1 da MOS (Tabela 2).

CONCLUSIONS

The adoption of the no-till system was effective in promoting greater increases in total organic carbon contents;

Conventional tillage had the lowest levels of total organic carbon throughout the soil profile studied (0-0.30 m);

The no-till system also provided the best benefits in increasing carbon in the F1, F2, and F3 fractions of soil organic matter;

The determination of the carbon in the oxidizable fractions of soil organic matter was a sensitive indicator for assessing the changes caused by land use systems;

No-till system increases total organic carbon levels, helping to mitigate greenhouse gases and improve soil quality.

CONCLUSÕES

A adoção do plantio direto foi eficiente em promover maiores incrementos nos teores de carbono orgânico total.

O plantio convencional apresentou os menores teores de carbono orgânico total ao longo do perfil do solo estudado (0-0,30 m);

O plantio direto, também, promoveu os melhores benefícios no incremento do carbono nas frações F1, F2 e F3 da matéria orgânica do solo;

A determinação do carbono nas frações oxidáveis da matéria orgânica do solo foi indicador sensível para avaliar as alterações causadas pelos sistemas de uso do solo;

A adoção do plantio direto aumenta os teores de carbono orgânico total, contribuindo na mitigação dos gases do efeito estufa e na promoção da melhoria da qualidade do solo.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

AUBERTIN, C. M.; JESUS, L. M. K. de. A contribuição do Brasil na COP21: O agronegócio do futuro. **Revista Terceira Margem Amazônica**, v. 6, n. 16, p. 35-52, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36882/2525-4812.2021v6i16.ed.esp.p35-52>

BARRETO, P. A. B.; GAMARODRIGUES, E. F.; GAMARODRIGUES, A. C.; FONTES, A. G.; POLIDORO, J. C.; MOÇO, M. K. S.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 81, n. 3, p. 213-220, 2011. DOI: <https://doi.org/DOI 10.1007/s10457-010-9300-4>

BATISTA, I.; CORREIRA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; ROUWS, J. R. C. Frações oxidáveis do carbono orgânico total e macrofauna edáfica em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira Ciência do solo**, v. 38, n. 1, p. 787-809, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300011>

BRIANEZI, D.; JACOVINE, L. A. G.; SCHETTINI, B. L. S.; TORRES, C. M. M. E.; ROCHA, S. J. S. S.; VILLANOVA, P. H.; OLIVEIRA NETO, S. N. O. B. Balança de carbono em monocultivo de eucalipto com diferentes arranjos espaciais. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 27-33, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21206/rbas.v9i1.3056>

BUENO, J. M. M.; DALMOLIN, R. S.; MIGUEL, P. Frações do carbono orgânico do solo sob diferentes usos da terra em áreas de agricultura familiar. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 12, n. 3, p. 194-201, 2017.

CARNEIRO, C. E. A.; MELÉM JÚNIOR, N. J.; AZEVEDO, M. C. B.; ANDRADE, E. A.; KOGUSHI, M. S.; DIEHL, R. C.; RICCE, W. S.; PASSARIN, A. L.; VAZ, R. H. M.; STELMACHUK, T. L. L.; GUIMARÃES, M. F.; RALISCH, R. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total e carbono residual de um latossolo vermelho eutroférico. **Semina**, v. 30, n. 1, p. 5-10, 2009.

CHAN, K. Y.; BOOOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxycpaleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, v. 166, n. 1, p. 61-67, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1097/00010694-200101000-00009>

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200041>

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para windows versão 4.0. In: Reunião Anual da RBRAS, 45., 2000, São Carlos. **Resumos...** São Carlos: RBRAS/UFSCar, p. 255-258, 2000.

GALEGO, J. C. X.; FERREIRA, R. C.; CARDUCCI, C. E. Sequestro de Carbono em um Latossolo caulinitico sob cultivo de linhaça em manejo conservacionista. **Recima** 21, v. 3, n. 4, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v3i4.1324>

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems. **Revista Ciências Agrônômicas**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 242-250, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000200005>

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.

LOSS, A.; BASSO, A.; OLIVEIRA, B. S.; KOUCHER, L. P.; OLIVEIRA, R. A.; KURTZ, C.; LOVATO, P. E.; CURMI, P.; BRUNETTO, G.; COMIN, J. J. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1212-1224, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683r bcs20140718>

LOSS A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 2014. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/15041>.

MELO, G. B.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; GUARESCHI, R. F.; SOARES, P. F. C. Estoques e frações da matéria orgânica do solo sob os sistemas plantio direto e convencional de repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1511-1519, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900050>

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711812019136>

OLIVEIRA, T. P.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; NANZER, M. C.; BARRETA, P. G. V.; SILVA, M. F. G.; QUEIROZ, G. R. S.; PRADO, E. A. F. Carbono lábil e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, n. 3, p. 49-56, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21206/rbas.v8i4.3068>

PINTO, L. A. S. R.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, O. A. Q.; SOUZA, R. S.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; MARTELLETO, L. A. P. Carbono orgânico e agregação do solo em áreas sob diferentes densidades de plantio da cultura da bananeira. **Brazilian Journal Development**, v. 6, n. 3, p. 10268-10285, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-053>

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; GUILHERME, L. R. G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 429-437, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000200013>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. (ed.). 2013. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. edição revisada e ampliada. Brasília: Embrapa, 353p.

SANTOS, T. M. D.; OZORIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; BISPO, L. S.; FARIA, E.; CASTILHO, S. C. P. Estoque de carbono e emissão de CO₂ em áreas manejadas e nativa na Região Cone-Sul de Mato Grosso do Sul. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 339-354, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e7666>

SILVA, J. R. M.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; REZENDE, J. V. O.; BARRETA, P. G. V.; ZUFFO, A. M. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, v. 15, n. 2, p. 1-6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i2a6874>

STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORD, J. W.; FIELD, D. J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; COURCELLES, V. R.; SINGH, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D. A.; BALDOCK, J.; BIRD, M.; BROOKES, P. C.; CHENU, C.; JASTROW, J.D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A. G.; PARTON, W. J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 164, n. 1, p. 80-89, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>

TETILA, E. C.; TETILA, J. L. C.; PISTORI, H.; SILVA, M. A. B. F. Desafios do modelo de desenvolvimento agrícola do estado de Mato Grosso do Sul: uma proposta para o desenvolvimento sustentável. **Interações**, v. 21, n. 3, p. 615-632, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v21i3.2430>

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono no solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 4, p. 1447-1469, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469>

VASCONCELOS, A. L. S.; FERRÃO, G. E.; CAMARGO, B.; CERRI, C. E. P.; PIRES, I. C. G.; SIQUEIRA NETO, M. Agricultura e emissões de gases de efeito estufa – estudos de casos no Brasil. **Revista Trópica**, v. 10, n. 2, p. 12-40, 2018. <https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/ccaatropica/article/view/5656>

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A. Rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 1, p. 1467-1476, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>