

## Estoque de carbono e emissão de CO<sub>2</sub> em áreas manejadas e nativa na Região Cone-Sul de Mato Grosso do Sul

### *Carbon stock and emission of CO<sub>2</sub> in managed and native areas in the south Cone Region of Mato Grosso do Sul*

*Thais Melissa Dias dos Santos<sup>1</sup>, Jefferson Matheus Barros Ozório<sup>2</sup>, Jean Sérgio Rosset<sup>3</sup>, Luan Soares Bispo<sup>4</sup>, Elias Faria<sup>5</sup>, Selene Cristina de Pierri Castilho<sup>6</sup>*

**RESUMO:** A grande demanda de alimento, fibras e energia impulsionaram a modificação de áreas nativas em sistemas de produção, que ao longo do tempo comprometeram os atributos do solo, além do estoque de carbono. Diante disso o estudo objetivou avaliar a dinâmica do carbono orgânico total (COT) do solo em diferentes sistemas de manejo conduzidos ao longo do tempo, no município de Mundo Novo, Mato Grosso do Sul. Foram avaliadas duas áreas manejadas: pastagem permanente de *coast-cross* (*Cynodon dactylon*), (pastagem - PA) e uma área que se encontrava com as mesmas condições da área de PA, porém em março de 2016 foi isolada, efetuando-se plantio de espécies arbóreas nativas, (área em recuperação - AR), além de uma área de referência (mata nativa - MN). Foram realizadas 3 coletas de solo nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m, sendo: a primeira no momento da implantação da recuperação, a segunda com seis meses e a terceira com doze meses após a implantação da recuperação. Foram determinados densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT), índice de estratificação (IE), estoque de carbono (EstC), variação no EstC ( EstC) e carbono mineralizável (C-CO<sub>2</sub>). A área de PA apresentou maior Ds, chegando a 1,72 Mg m<sup>-3</sup>. A AR teve teores superiores de COT, com aumento (17,31, 18,70 e 22,67 g kg<sup>-1</sup>) no tempo 0, 6 e 12 meses, respectivamente, e consequente aumento do IE e maiores EstC após 12 meses. As áreas de AR e PA apresentaram valores positivos de EstC em relação à área de MN. Houve maior atividade biológica representada pela emissão de C-CO<sub>2</sub> na AR até seis meses após o isolamento da área, com consequente diminuição após 12 meses. As práticas de isolamento e reflorestamento AR contribuíram para a melhoria da qualidade do ambiente edáfico em função do tempo em relação à fração orgânica do solo.

**Palavras-chave:** Avaliação ambiental. Conservação do solo. Dinâmica do carbono orgânico total.

**ABSTRACT:** Great demand in food, fibers and energy triggers the modifications of native areas in production system which, throughout time, jeopardize soil and carbon stock. Current analysis evaluates the dynamics of total organic carbon (COT) of the soil at different management systems in the municipality of Mundo Novo MS Brazil. Two managed areas were evaluated: permanent pasture with *coast-cross* (*Cynodon dactylon*), (pasture – PA) and an area with the same conditions as the PA area which, in March 2016, was isolated and planted with native trees (recovery area – AR) and a reference are (native wood -MN). Three soil collections were undertaken, at layers 0-0.05, 0.05-0.1 and 0.1-0.2 m, or rather, at implantation of recovery, after six months and after twelve months. Soil density (Ds), total organic carbon (COT), stratification indexes (IE), carbon stock (EstC), variation in EstC ( EstC) and mineralizable carbon (C-CO<sub>2</sub>) were calculated. PA area had the highest Ds rate, with 1.72 Mg m<sup>-3</sup>. AR had the highest rates of COT, with increase (17.31, 18.70 and 22.67 g kg<sup>-1</sup>) at 0, 6 and 12 months respectively and a subsequent increase in IE, and greatest EstC rates after 12 months. AR and PA areas show positive rates of EstC with regard to MN area. There was a greater biological activity represented by C-CO<sub>2</sub> emission in AR up to six months after the isolation of the area, with a decrease after 12 months. Isolation and reforestation contribute towards an improvement in edaphic environment due to time when compared to the soil's organic fraction.

**Keywords:** Dynamics of total organic carbon. Environmental evaluation. Soil conservation.

#### **Autor correspondente:**

Jefferson Matheus Barros Ozório: [ozorio.jmb@outlook.com](mailto:ozorio.jmb@outlook.com)

Recebido em: 19/12/2019

Aceito em: 20/04/2020

<sup>1</sup> Doutoranda do programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Dourados (MS), Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando do programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Dourados (MS), Brasil.

<sup>3</sup> Professor adjunto IV do curso de Tecnologia em Gestão Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo (MS), Brasil.

<sup>4</sup> Graduando em Tecnologia em Gestão Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo (MS), Brasil.

<sup>5</sup> Graduando do curso de Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo (MS), Brasil.

<sup>6</sup> Professor adjunto IV do curso de Tecnologia em Gestão Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Mundo Novo (MS), Brasil.

## INTRODUÇÃO

O aumento da demanda global por alimentos, fibras e energia favoreceu a conversão de áreas de vegetação nativa em terras agrícolas no Brasil, principalmente para produção de soja (MERTEN *et al.*, 2015). A conversão dos ecossistemas naturais em ambientes de cultivo promove alterações na dinâmica do carbono (C) no solo, sendo que essas modificações frequentemente provocam o declínio no teor de C orgânico, em função da redução do aporte, perdas por erosão e por decomposição da matéria orgânica (DENARDIN *et al.*, 2019). Os sistemas agropecuários vêm apresentando nos últimos anos crescente interesse nos efeitos do manejo do solo e nos estoques de carbono (EstC) do solo (MOS) (LAL, 2018), principalmente por que o aumento do armazenamento de carbono (C) em solos agrícolas contribui para minimizar as mudanças climáticas, além de promover melhorias nos sistemas de produção (KOVEN *et al.*, 2017; ROSSET *et al.*, 2019; ASSUNÇÃO *et al.*, 2019; OZÓRIO *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2020).

Outro fator que compromete significativamente a qualidade do solo e a dinâmica do C são as áreas degradadas, que comprometem o funcionamento do ecossistema (SMITH *et al.*, 2017). Uma das principais técnicas de recuperação utilizada mundialmente é a revegetação, que promove a longo prazo a recuperação do solo com aumento dos estoques de C (GAO *et al.*, 2018). No Brasil muitas áreas de pastagem apresentam algum nível de degradação, isso compromete o grande potencial que as pastagens têm em acumular C, principalmente em camadas subsuperficiais (SALTON *et al.*, 2008).

Uma importante área de interesse de pesquisa atual é entender os fatores que controlam o estoque de C do solo e sua estabilidade em resposta ao manejo de pastagens (WARD *et al.*, 2016). Isso ocorre porque o armazenamento do C no solo em longo prazo é necessário para a mitigação das mudanças climáticas, e requer estabilização em formas menos suscetíveis a perdas (ADKINS *et al.*, 2016).

340 O estoque de carbono orgânico do solo está relacionado com o modo de uso e das práticas agrícolas adotadas (LAL, 2018; SINGOR *et al.*, 2018; ASSUNÇÃO *et al.*, 2019; REGO *et al.*, 2020). Em área de vegetação nativa, o teor de C é estável e pouco varia ao longo do tempo; sistemas conservacionistas de produção agrícola, como plantio direto (ROSSET *et al.*, 2014; 2016), reflorestamento e sistemas agroflorestais, tendem a armazenar mais C, pelo grande aporte de material orgânico acumulado na superfície e ainda contribuem positivamente nas características físicas, químicas (SALES *et al.*, 2018) e biológicas do solo (FERREIRA *et al.*, 2019).

O uso e manejo inadequado do solo, além de contribuírem para a emissão de gases do efeito estufa (GEEs), prejudicando o ambiente, ainda trazem inúmeros problemas relacionados à sua sustentabilidade em razão da degradação da matéria orgânica do solo (MOS), alterando negativamente, por consequência, os atributos físicos e químicos do solo, bem como sua biodiversidade. Entretanto, práticas adequadas de manejo, que visam a manutenção ou mesmo o acúmulo de C no sistema solo-planta, podem atenuar os efeitos do aquecimento global (KOVEN *et al.*, 2017).

Além de seu papel no balanço global de C, os solos também são um recurso vital para a humanidade, abrindo a biodiversidade, regulando ciclos de nutrientes, produção de alimentos, erosão e qualidade de água doce (KEESSTRA *et al.*, 2016). Portanto, muitos pesquisadores acreditam que ações que visam às reduções dos GEEs devem ser imediatamente colocadas em prática para garantir a resiliência desse importante ecossistema frente às oscilações climáticas atuais (KOVEN *et al.*, 2017; LAL, 2018; OZÓRIO *et al.*, 2019; ROSSET *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2020; ASSUNÇÃO *et al.*, 2019). Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a dinâmica do carbono orgânico total do solo em diferentes sistemas de manejo conduzidos ao longo do tempo na região Cone Sul do Estado de Mato Grosso do Sul.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Mundo Novo fica situado na região Cone Sul do Estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1), o clima da região é subtropical (Cfa), com período de chuvas de outubro a março. A temperatura média do mês mais frio

está entre 14 e 15 °C, com ocorrência de geadas. As precipitações variam de 1.400 a 1.700 mm anuais (SEMADE, 2015). Foram coletadas amostras de solo em diferentes áreas, que estão sob um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa, segundo levantamento detalhado de solos do Estado de Mato Grosso do Sul (SEMADE, 2015; SANTOS, 2013).

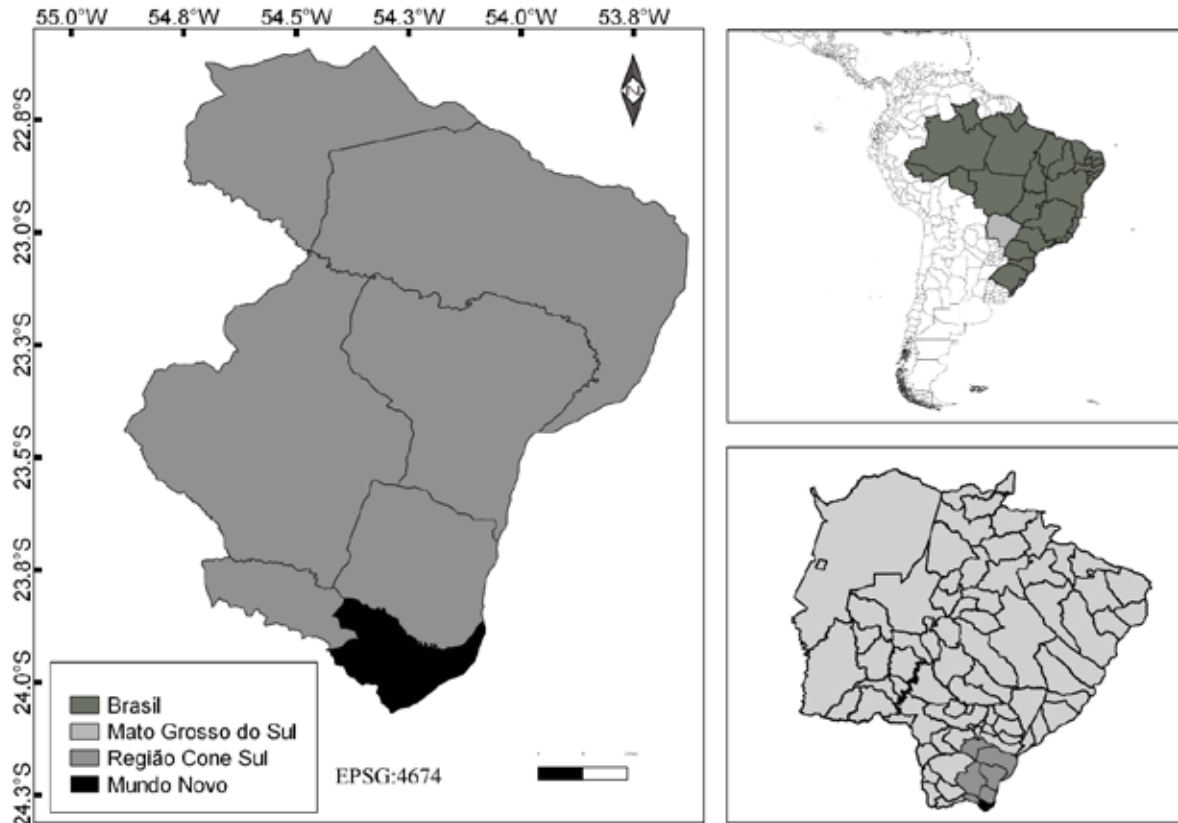


Figura 1. Imagem do município de Mundo Novo (MS). Elaborado pelos autores.

Foram avaliadas duas áreas manejadas, além de uma área de referência (mata nativa - MN) sem ação antrópica, perfazendo três sistemas diferenciados analisados em função do tempo de condução em delineamento inteiramente casualizado. As duas áreas manejadas compreendem: área de pastagem permanente *coast-cross* (*Cynodon dactylon*), com lotação de bovinos de corte de 3,5 UA ha<sup>-1</sup>, com sinais visíveis de degradação (pastagem - PA) e uma área que se encontrava com as mesmas condições da área de PA, porém em março de 2016 foi isolada (cercada - para evitar que os bovinos entrem na área), sendo efetuado o plantio de espécies arbóreas nativas (reflorestamento) para recuperação (área em recuperação - AR) (Quadro 1).

Quadro 1. Histórico, descrição e localização das áreas de estudo

Sistema de manejo	Descrição
Pastagem - PA	14 ha; 299 m de altitude, 23°56'052" S e 54°17'058" O; permanente com <i>coast-cross</i> ( <i>Cynodon dactylon</i> ).
Área em recuperação - AR	0,5 ha; 298 m de altitude, 23°56'051" Sul (S) e 54°17'057" Oeste (O).
Mata Nativa - MN	2 ha; Área sob vegetação nativa (Mata Atlântica - Floresta Estacional Semidecidual), 293 m de altitude, 23°56'048" S e 54°17'033" O, utilizada como referencial.

A caracterização química e física das áreas de estudo é apresentada na Tabela 1. Destaca-se que três áreas estudadas apresentam teor de argila menor que 150 g kg<sup>-1</sup>, sendo consideradas de textura arenosa (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização física e química das áreas estudadas

AE	areia	silte	argila	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V
	-----g kg <sup>-1</sup> -----			CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		-----cmolcdm <sup>-3</sup> -----					%	
PA	772	116	112	4,99	18,86	1,36	0,08	2,4	1,2	0,08	3,0	3,68	6,68	55,1
AR	772	133	95	5,12	25,42	1,95	0,11	2,1	1,1	0,00	2,6	3,31	5,91	56,0
MN	805	67	128	4,74	17,76	4,29	0,10	1,5	1,1	0,06	2,8	2,70	5,50	49,1

Análises realizadas referentes à coleta zero (março de 2016). Laboratório: NUTRISOLO, Ivinhema (MS). AE: áreas de estudo. PA: pastagem. AR: área em recuperação. MN: mata nativa. Granulometria: método da pipeta. Caracterização química - Cloreto de Cálcio (pH); Mehlich (P e K); KCl 1N (Ca, Mg e Al); Acetato de Cálcio pH 7,0 (H + Al); Oxidação por dicromato de potássio (MO).

## 2.2 COLETA DE AMOSTRA DE SOLO

Em cada área de estudo foram demarcadas quatro glebas de 400 m<sup>2</sup>, nas quais foram realizadas as coletas das amostras de solo no tempo zero (0) meses (março de 2016), após seis (6) meses (setembro de 2016) e doze (12) meses (março de 2017), (tempo este, sendo considerado em função do momento do isolamento e da prática do reflorestamento da AR, que ocorreu em março de 2016), sendo que cada gleba representou uma repetição. Cada amostra composta foi representada por cinco amostras simples dentro das áreas de estudo, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,1 e 0,1-0,2 m. Após a coleta, parte das amostras deformadas foi seca ao ar, destorroada e passada por peneira 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) para análises de COT. Outra parte das amostras deformadas foi colocada sob refrigeração para posteriores análises de evolução de carbono mineralizável (C-CO<sub>2</sub>). Também foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de anel volumétrico com volume de 48,86 cm<sup>3</sup> com quatro repetições em todas as áreas e camadas.

## 2.3 ANÁLISES REALIZADAS

Todas as análises foram realizadas nos três tempos de coleta (zero, seis e doze meses), com exceção das análises granulométricas que serviram somente para caracterização das áreas de estudo. As análises de densidade do solo (Ds) foram realizadas segundo metodologia descrita por Claessen (1997). O carbono orgânico total (COT) foi determinado pela oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio, em meio sulfúrico, com aquecimento externo e titulado com sulfato ferroso amoniacal na presença do indicador Ferroin (YEOMANS; BREMNER, 1988). A partir dos resultados de COT, foram calculados os estoques de carbono orgânico total (EstC) segundo o método da massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995; SISTI *et al.*, 2004).

Para verificar tendências de acúmulo ou perda de COT em comparação com o sistema de referência (mata nativa), foi calculada a variação do EstC (EstC, Mg ha<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>) nas três coletas, sendo esse obtido pela diferença entre os valores médios de EstC neste sistema (referência) e em cada um dos demais, sendo que o valor obtido foi dividido pela espessura (cm) de cada camada. Além disso, foi calculado o índice de estratificação do carbono (IE) mediante relação entre os teores de COT da camada de 0-0,05 m em relação à camada de 0,1-0,2 m (camada arável) conforme proposto por Franzluebbers (2002).

Para avaliação da evolução de C-CO<sub>2</sub> (carbono mineralizável) em laboratório, as amostras de solo para cada uma das três coletas, previamente acondicionadas sob refrigeração, foram destorroadas e passadas em peneira 2 mm constituindo a TFSA (CLAESSEN, 1997). Para a avaliação do C-CO<sub>2</sub> liberado em laboratório, foi utilizado o método proposto por Mendonça e Matos (2005), em que 50 g de solo da camada de 0-0,05 m foram colocados em recipientes de plástico de 5000 cm<sup>3</sup>, fechados hermeticamente. Os recipientes de plástico (4 repetições por sistema de uso do

solo) foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado em laboratório. A cada recipiente foi adicionado um frasco contendo 30 mL de solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, para capturar o C-CO<sub>2</sub> e outro contendo 30 mL de H<sub>2</sub>O (para manter a umidade constante). As medições de C-CO<sub>2</sub> foram feitas em intervalos de 24 h nos primeiros 7 dias, de 48 h entre o 8º e 17º dia e de 96 h até o 49º dia conforme efetuado por Loss *et al.* (2013).

Após todas as análises realizadas, em delineamento inteiramente casualizado, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F, e os valores médios foram comparados entre si pelo teste de Tukey a 5% com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2006).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a primeira e segunda coletas, a área de PA apresentou os maiores valores de Ds, especialmente comparando com a área de MN, chegando a 1,72 Mg m<sup>-3</sup> na camada de 0-0,05 m para a primeira coleta (Tabela 2). Esse valor de 1,72 Mg m<sup>-3</sup> é superior a 1,60 Mg m<sup>-3</sup> considerado crítico para o desenvolvimento da maioria das culturas (SILVA; ROSOLEM, 2001).

**Tabela 2.** Densidade do solo (Ds) nos diferentes sistemas, camadas e tempos de coleta estudados

SM	Ds (Mg m <sup>-3</sup> )			CV (%)**
	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta	
		0-0,05 m		
PA	1,72aA	1,50abA	1,45bA	8,10
AR	1,35aB	1,32aAB	1,26aA	11,90
MN	1,36aB	1,22aB	1,32aA	5,50
CV (%)*	6,90	7,60	11,60	
		0,05-0,1 m		
PA	1,66aA	1,47aA	1,47aA	6,60
AR	1,47aAB	1,46aA	1,45aA	8,50
MN	1,40aB	1,27aA	1,35aA	5,60
CV (%)*	6,60	7,50	7,10	
		0,1-0,2 m		
PA	1,60aA	1,58aA	1,48aA	8,10
AR	1,44aAB	1,48aAB	1,52aA	7,10
MN	1,29aB	1,31aB	1,39aA	7,20
CV (%)*	5,60	7,50	9,00	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha para cada área e maiúscula na coluna para cada camada não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (5%). SM: sistemas de manejo; PA: Pastagem; AR: Área em recuperação; MN: Mata nativa. CV\*: Coeficiente de variação nas análises entre os sistemas de manejo na mesma coleta. CV\*\*: Coeficiente de variação nas análises do mesmo sistema de manejo nas diferentes coletas.

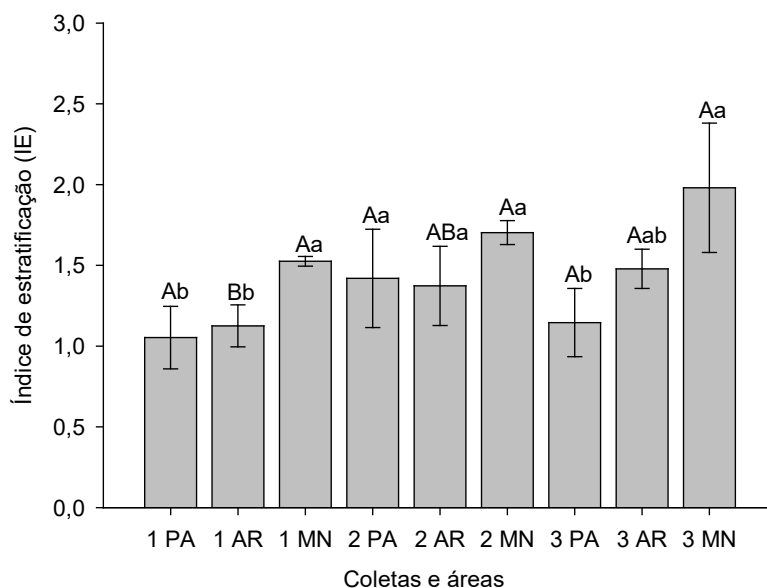
Esses valores de Ds acima de 1,60 Mg m<sup>-3</sup> podem ocasionar prejuízos à qualidade edáfica pois prejudicam o desenvolvimento das plantas, ocasionam aumento da resistência à penetração de raízes, alteram a movimentação de água e nutrientes e a difusão de oxigênio e outros gases (SILVA *et al.*, 2006). Pastagens com elevada lotação animal tendem a apresentar maiores valores de Ds quando comparadas a outras formas de manejo com menor carga animal



demais camadas a AR não apresentou diferenças em função do tempo, demonstrando que as alterações no conteúdo de COT ocorrem primeiramente na camada superficial do solo (SALTON *et al.*, 2008; ROSSET *et al.*, 2019; FERREIRA *et al.*, 2020). Dessa forma, avaliando a dinâmica do COT em função do tempo de condução experimental, é notório o aumento do COT na AR na camada mais superficial avaliada, sendo possível evidenciar benefícios do isolamento e plantio de espécies arbóreas nativas. O aumento de COT é fundamental na recuperação de áreas degradadas, já que há associação direta com a melhoria da qualidade do solo decorrente do aumento no fornecimento de nutrientes e melhoria nos atributos do solo (DENARDIN *et al.*, 2019).

A área de PA, principalmente por apresentar taxa de lotação animal elevada, com conseqüente baixo potencial de rebrota e cobertura do solo como observado a campo, não apresentou aumentos nos teores de COT com o passar do tempo de avaliação em nenhuma camada avaliada (Tabela 3). Um melhor manejo das pastagens contribui significativamente para aumento nos teores de COT, principalmente em camadas subsuperficiais, pela contribuição das raízes que depositam materiais orgânicos (SANTOS *et al.*, 2019; SALTON *et al.*, 2008).

Com relação ao índice de estratificação (IE) do COT, verificou-se em todas as áreas valores acima da 1,00, o que segundo Franzluebbbers (2002) indica melhoria na qualidade do solo. Para a primeira coleta (0 meses) e a terceira coleta (12 meses), a área de MN apresentou valor do IE superior às duas áreas manejadas (PA e AR), com valor do IE chegando a 1,98 na terceira coleta. A PA apresentou na primeira e terceira coletas valor de IE semelhantes. Destaca-se que na segunda coleta a área de PA apresentou seu maior valor de IE entre as três coletas (Figura 2). Isso reflete a contribuição da deposição de matéria orgânica superficial, associada à menor taxa de decomposição, pelo não revolvimento do solo, além de maior concentração de raízes nessas camadas, principalmente de gramíneas (SALTON *et al.*, 2008).



**Figura 2.** Índice de estratificação do COT nas diferentes áreas estudadas. Os números 1, 2 e 3 representam as coletas em função do tempo (tempo zero meses, tempo seis meses e tempo 12 meses), respectivamente. PA: pastagem; AR: área em recuperação; MN: mata nativa. Médias seguidas de mesma letra maiúscula para cada área por coleta e minúscula entre as áreas em cada coleta não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (5%).

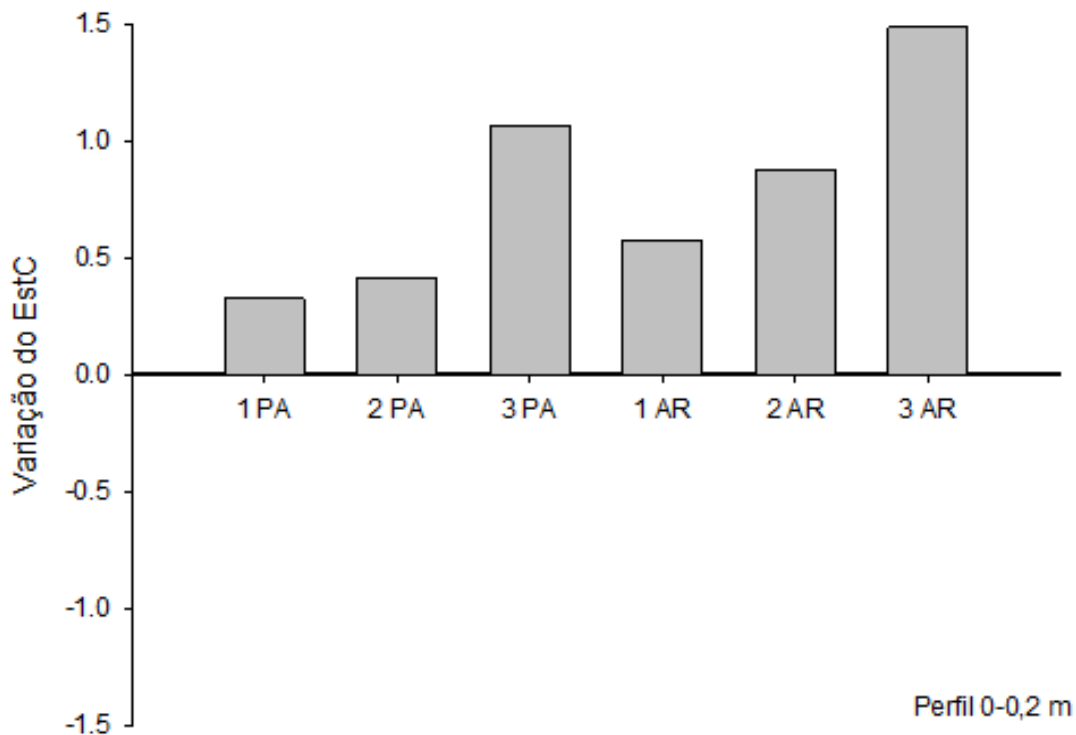
Já observando a AR, a mesma apresentou aumento significativo do IE quando se comparam a primeira e a terceira coletas, com valores de IE de 1,13 e 1,48, respectivamente (Figura 2). Esse resultado demonstra o acúmulo superficial de COT na camada de 0-0,05 m em relação à camada de 0,1-0,2 m ao longo do tempo, como também demonstrado na Tabela 3. Esse fato comprova a maior estratificação de C no solo, o que, ao longo do tempo, pode





Resultado diferente do observado na área de PA, que em nenhuma camada avaliada os EstC aumentaram (Tabela 3), sendo esse resultado condizente ao observado também para os teores de COT (Tabela 2). Quando as pastagens recebem boas práticas culturais, existe potencial de acúmulo de C em todo o perfil do solo, pois, principalmente o sistema radicular das pastagens bem manejadas contribuem para o aumento dos EstC, sendo esse padrão diferente de pastagens degradadas (SANTOS *et al.*, 2019). Rosa *et al.* (2014) ressaltam que, com um manejo adequado, as pastagens podem contribuir não somente na produção animal, mas também no combate ao aumento da emissão de GEEs, pois possuem potencial de acúmulo de C sendo que, em muitos casos, um potencial superior às áreas de vegetação natural. Nesse cenário, a adoção de práticas corretas para recuperação de ecossistemas degradados vem ganhando importância.

Os resultados da variação do estoque de carbono orgânico total ( $\Delta$ EstC) do perfil do solo das áreas manejadas (PA e AR) em relação à área de MN estão apresentados na Figura 3. Para as duas áreas manejadas (PA e AR), nas três coletas, foram observados valores positivos de  $\Delta$ EstC em relação à área de MN, indicando assim maiores EstC nestas áreas em relação à área de referência (MN).



**Figura 3.** Variação no estoque de carbono orgânico total ( $\Delta$ EstC) das áreas manejadas em relação à área de mata nativa no perfil de 0-0,2 m, ao longo do tempo de avaliação. Os números 1, 2 e 3 representam as coletas em função do tempo (tempo zero, seis e 12 meses), respectivamente. PA: área de pastagem e AR: área em recuperação.

Tanto para a área de PA, quanto para a AR, foram observados aumentos da  $\Delta$ EstC em função do tempo de avaliação, especialmente após 12 meses. Os dados de  $\Delta$ EstC no solo permitem observar os sistemas que estão emitindo ou armazenando C-CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

Esses resultados podem ser atribuídos devido ao conteúdo de C no perfil do solo da área de MN não ser, na somatória do perfil, positivo em relação às áreas de PA e AR, fato esse comprovado pelos teores de COT (Tabela 2) e EstC (Tabela 3), mesmo a área de MN apresentar IE superior às áreas de PA e AR na primeira coleta e PA na terceira coleta (Figura 2). Um dos principais indicadores da qualidade do solo é o EstC (SALES *et al.*, 2018; LIANG *et al.*, 2019), pois contribui para melhoria dos atributos edáficos (LAL, 2018).

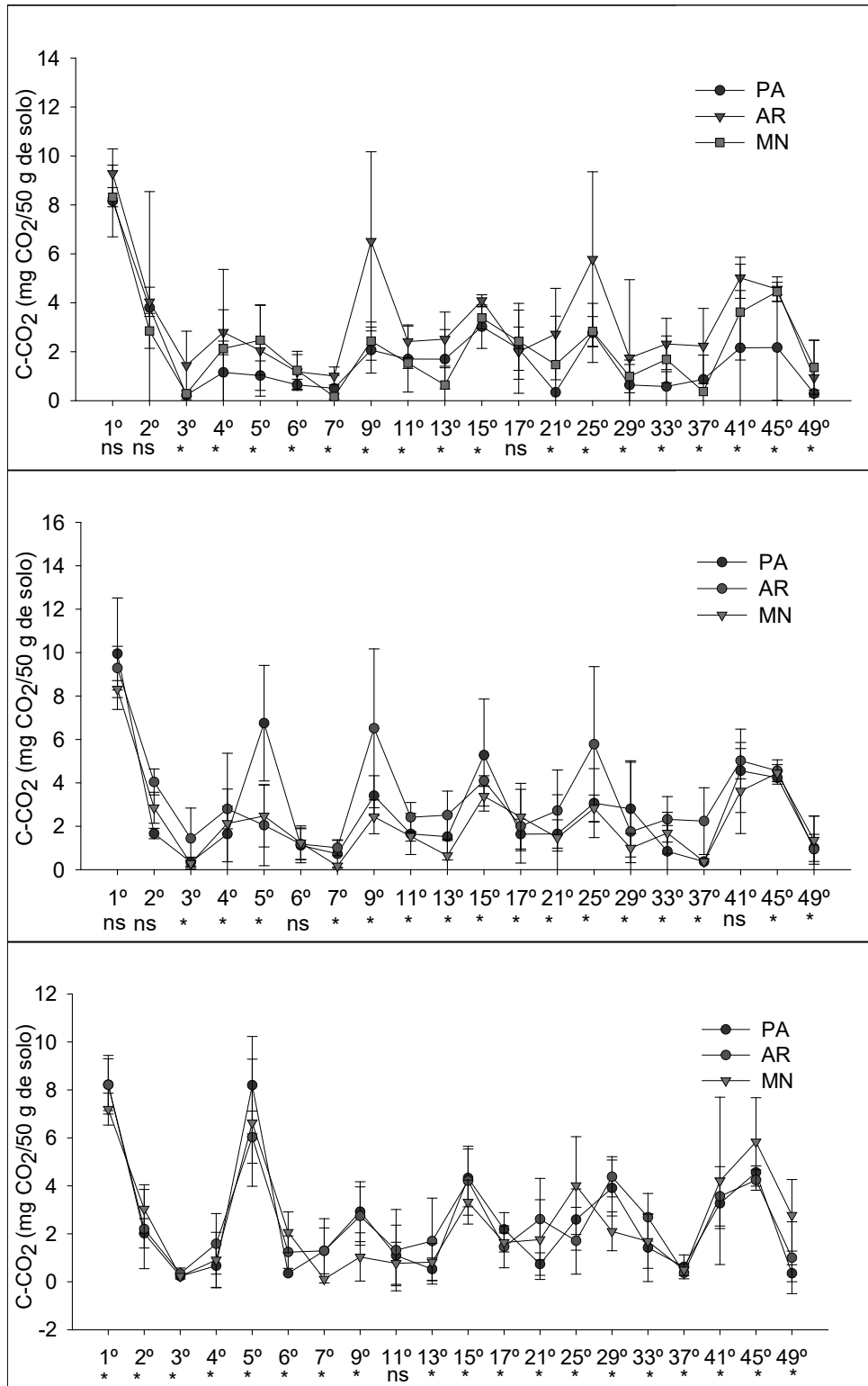
A Figura 4 demonstra o padrão de evolução de carbono mineralizável (C-CO<sub>2</sub>) nas amostras de solos incubadas em laboratório. Logo após a incubação (1º dia de avaliação), houve diferentes padrões de evolução de C-CO<sub>2</sub>, variando de 8,0 a 9,5 mg de C-CO<sub>2</sub>/50 g de solo nas amostras da primeira coleta, 9,0 a 10,0 mg C-CO<sub>2</sub>/50 g de solo na segunda coleta, e entre 7,2 e 8,3 mg C-CO<sub>2</sub>/50 g de solo na terceira coleta. Esse padrão revela o consumo imediato de C lábil prontamente disponível para o ataque microbiano, o que posteriormente pode influenciar nos processos de humificação e estabilização do C no solo ao longo do tempo, aumentando o EstC (LOSS *et al.*, 2013), como também observado por Rosset *et al.* (2019) em estudo realizado na região Oeste do Estado do Paraná.

Para a terceira coleta, esses menores valores de emissão de C-CO<sub>2</sub> no primeiro dia de incubação do solo evidenciam, especialmente na AR, após 12 meses do isolamento e plantio de espécies arbóreas nativas, aumento na estabilização do C, resultando diminuição de emissão de C-CO<sub>2</sub> (Figura 4). No 5º dia de incubação para a segunda e terceira coletas, as áreas de PA e AR apresentaram picos de emissão de C-CO<sub>2</sub> variando entre 6,0 e 8,3 mg de C-CO<sub>2</sub>/50g de solo, sendo superiores em comparação com a MN, que manteve variação de 4,5 a 6,8 mg de C-CO<sub>2</sub>/50 g, respectivamente, para as duas coletas (Figura 4).

Essa reação pode-se ser explicada devido ao padrão médio da ação dos microrganismos em relação à MOS estável presente na área de MN, enquanto que a área de PA ainda apresentava a prática de pastejo e, principalmente, a AR estava em processo de regeneração. Essa resposta rápida, representada pelos picos de emissão de C-CO<sub>2</sub>, reflete a sensibilidade desta análise em detectar mudanças rápidas nas formas de manejo do solo com a prática de isolamento da área, associado ao plantio de espécies arbóreas nativas, fazendo com que houvesse maior atividade dos microrganismos em determinados dias específicos. Isso é corroborado com o trabalho de Ghosh *et al.* (2018), no qual indicam que os microrganismos possuem a capacidade de dar respostas rápidas a mudanças na qualidade do solo.

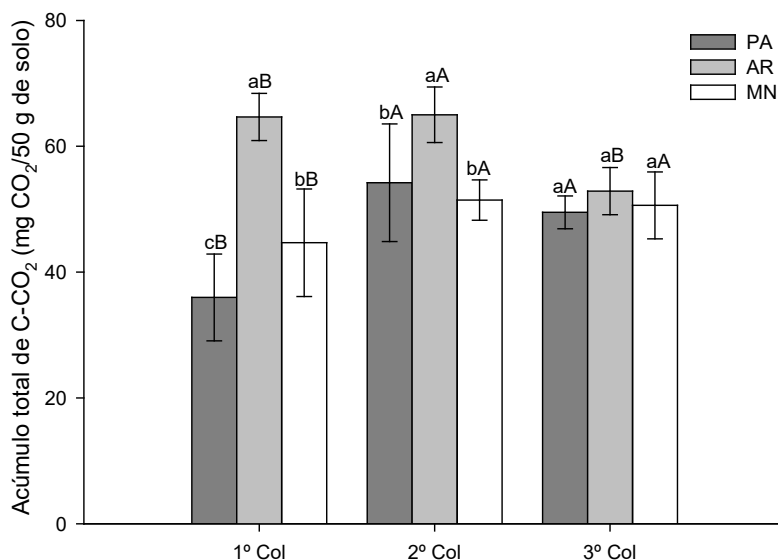
Especificamente no 9º e 25º dias, para as três coletas, a AR se destacou, apresentando maiores picos de emissão de C-CO<sub>2</sub>; sendo que na primeira coleta o padrão desta evolução de C-CO<sub>2</sub> foi maior dentre as três coletas, emitindo até 6,7 mg de C-CO<sub>2</sub>/50 g de solo (Figura 4). Em relação à área de MN nesses mesmos dias, para as três coletas, não houve grandes diferenças nos padrões de emissão de C-CO<sub>2</sub>. Estes picos de C-CO<sub>2</sub> são conhecidos como efeito *priming*, em que a estimulação da atividade microbiana pela adição de resíduos orgânicos e/ou maior disponibilidade de MOS prontamente decomponível (menor relação C/N) favorece a aceleração da decomposição da MOS (GHOSH *et al.*, 2018) aumentando, conseqüentemente, a evolução de C-CO<sub>2</sub> em determinados dias (WADE *et al.*, 2018).

No 45º dia ocorreu o último pico de emissão de C-CO<sub>2</sub> das três áreas nas três coletas, sendo verificada tendência de estabilização da evolução de C-CO<sub>2</sub> (Figura 4). Esse padrão é ocasionado pelo consumo da MOS por meio da microbiota (LOSS *et al.*, 2013). Esses microrganismos ao se alimentarem da MOS disponível, liberam C-CO<sub>2</sub>, culminando nos picos observados. Entretanto, quando eles morrem por falta de MOS mais lábil, a emissão de C-CO<sub>2</sub> diminui, acarretando a estabilização da respiração microbiana (LOSS *et al.*, 2013).



**Figura 4.** Evolução diária de C-CO<sub>2</sub> nas amostras de solos incubadas até os 49 dias de avaliação, nos diferentes tratamentos avaliados. \* = significativo pelo teste Tukey a 5%; ns = não significativo pelo teste F a 5%.

Quando se avalia as diferentes áreas na mesma coleta, observa-se que na primeira e segunda coletas a AR apresentou maiores emissões acumuladas de C-CO<sub>2</sub>, com valores chegando a 65,00 mg C-CO<sub>2</sub>/50g de solo na segunda coleta (Figura 5). Esses resultados podem ser devidos aos maiores teores de COT desta área (Tabela 2), também provavelmente devido à presença de maiores teores de C lábil do solo (HURISSO *et al.*, 2018), pois a vegetação que foi se instalando na área, aliada também a dessecação química da pastagem presente na AR para facilitar o plantio das mudas das espécies arbóreas nativas, deu início ao processo de deposição de serapilheira.



**Figura 5.** Acúmulo de C-CO<sub>2</sub> (mg CO<sub>2</sub>/50g de solo) durante 49 dias de incubação nas diferentes áreas avaliadas. Médias seguidas de mesma letra maiúscula em cada área por coleta, e minúscula entre as áreas em cada coleta não diferem estatisticamente pelo teste Tukey (5%). PA: Pastagem; AR: Área em recuperação; MN: Mata nativa.

Somente na terceira coleta não houve diferenças significativas em todas as áreas avaliadas. De acordo com Bayer *et al.* (2002) a concentração de resíduos vegetais recentes na superfície do solo acelera a entrada de compostos orgânicos, sendo por vezes maior que a capacidade dos microrganismos do solo em metabolizá-los, o que contribui para o acúmulo de C-CO<sub>2</sub>.

Verificou-se que houve diminuição da emissão de C-CO<sub>2</sub> na AR quando se passou da primeira e segunda coletas para terceira coleta. Esse maior efluxo inicial se deve a transformação e consumo pela biomassa microbiana, de compostos como açúcares, amido e proteínas simples. Com o passar do tempo, esses compostos diminuem, restando os mais recalcitrantes, como gorduras, ligninas e compostos fenólicos, que são de difícil transformação, diminuindo acima atividade microbiana e a liberação de C-CO<sub>2</sub> (WADE *et al.*, 2018).

Dessa forma, com o isolamento e plantio de espécies nativas na AR, com o passar do tempo, a emissão de C-CO<sub>2</sub> total diminuiu. Esse fato pode estar relacionado a AR não sofrer com ações antrópicas há 12 meses, sendo assim, as etapas do processo de humificação podem ter sido beneficiadas (BENBI *et al.*, 2015), ou seja, o C do solo foi se estabilizando, o que resulta maior proporção de frações mais estáveis e de maior estabilidade estrutural (ROSSET *et al.*, 2016; HURISSO *et al.*, 2018).

#### 4 CONCLUSÕES

A área de recuperação não apresentou modificações nos valores de densidade do solo, possivelmente em função do tempo curto de avaliação.

A área de recuperação apresentou melhoria na qualidade do solo quando se avaliou os teores de carbono orgânico total, estoques de carbono e índice de estratificação, indicando assim a recuperação desta área em função do tempo.

Com o passar do tempo constatou-se maior número de picos de emissão de C-CO<sub>2</sub> na área em recuperação.

Houve maior atividade biológica representada pelo acúmulo da emissão de C-CO<sub>2</sub> na área em processo de recuperação até seis meses após o isolamento da área, sendo que a diminuição da emissão após um ano reflete a estabilização do carbono no solo, o que, em longo prazo, pode contribuir para aumento dos teores e estoques de carbono desta área.

## REFERÊNCIAS

- ADKINS, J.; JASTROW, J. D.; MORRIS, G. P.; SIX, J.; GRAAFF, M. Effects of switchgrass cultivars and intraspecific differences in root structure on soil carbon inputs and accumulation. *Geoderma*, v. 262, p. 147-154, 2016.
- ARAUJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. *Forest Ecology and Management*, v. 407, p. 210-220, 2018.
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 658, n. 1, p. 901-911, 2019.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S. C.; MILORI, D. M. B. P.; BAGNATO, V. S. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. *Geoderma*, v. 105, n. 1, p. 81-92, 2002.
- BENBI, D. K.; BRAR, K.; TOOR, A. S.; SINGH, P. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in northern India. *Geoderma*, v. 237, p. 149-158, 2015.
- CLAESSEN, M. E. C. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212p.
- COLOMBO, G. A.; LOPES, M. B. S.; DOTTO, M. C.; CAMPESTRINI, R.; LIMA, S. O. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado tocantinense. *Campo Digital*, v. 12, n. 1, p. 21-29, 2017.
- CRUZ, C. D. **Programa genes: biometria**. Viçosa: UFV, 2006. 382p.
- DENARDIN, L. G. D. O.; CARMONA, F. D. C.; VELOSO, M. G.; MARTINS, A. P.; DE FREITAS, T. F. S.; CARLOS, F. S.; MARCOLIN, E.; CAMARGO, F. A. O.; ANGHINONI, I. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. *Soil and Tillage Research*, v. 186, p. 64-69, 2019.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal Soil Science*, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.
- FERREIRA, C. R.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Diversity of the edaphic macrofauna in areas managed under no-tillage for different periods. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 40, n. 2, p. 599-610, 2019.
- FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. *Soil & Tillage Research*, v. 198, p. 1-9, 2020.
- FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002.
- GAO, X.; LI, H.; ZHAO, X.; MA, W.; WU, P. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. *Geoderma*, v. 319, p. 61-69, 2018.
- GHOSH, A.; BHATTACHARYYA, R.; MEENA, M. C.; DWIVEDI, B. S.; SINGH, G.; AGNIHOTRI, R.; SHARMA, C. Long-term fertilization effects on soil organic carbon sequestration in an Inceptisol. *Soil & Tillage Research*, v. 77, p. 134-144, 2018.
- HURISSO, T. T.; CULMAN, S. W.; ZONE, P.; SHARMA, S. Absolute values and precision of emerging soil health indica-

tors as affected by soil sieve size. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 15, p. 1934-1942, 2018.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDA, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J. N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L. O. A importância dos solos e da ciência do solo para a realização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, **Soil & Tillage Research**, v. 2, p. 111-128, 2016.

KOVEN, C. D.; HUGELIUS, G.; LAWRENCE, D. M.; WIEDER, W. R. Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 817, 2017.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, p. 3285-3301, 2018.

LIANG, A.; ZHANG, Y.; ZHANG, X.; YANG, X.; MCLAUGHLIN, N.; CHEN, X.; TANG, J. Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined non-destructive measurements and phospholipid fatty acid analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 185, p. 94-101, 2019.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Carbono mineralizável, carbono orgânico e nitrogênio em macroagregados de Latossolo sob diferentes sistemas de uso do solo no Cerrado Goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 5, p. 2153-2168, 2013.

LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; SCHMITZ, D.; VEIGA, M.; KURTZ, C.; COMIN, J. J. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Colombiana de Ciências Hortícolas**, v. 11, n. 1, p. 105-113, 2017.

MACINTOSH, K. A.; DOODY, D. G.; WITHERS, P. J.; MCDOWELL, R. W.; SMITH, D. R.; JOHNSON, L. T.; BRUULSEMA, T. W.; O'FLAHERTY, V.; MCGRATH, J. W. Transforming soil phosphorus fertility management strategies to support the delivery of multiple ecosystem services from agricultural systems. **Science of the total environment**, v. 649, p. 90-98, 2019.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Ponte Nova: D & M Gráfica e Editora Ltda, 2005. 107p.

MERTEN, G. H.; ARAÚJO, A. G.; BISCAIA, R. C. M.; BARBOSA, G. M. C.; CONTE, O. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 152, p. 85-93, 2015.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; SUZUKI, L. E.; VAN ES, H. M. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 183-190, 2019.

OZÓRIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J.; PANACHUKI, E.; SOUZA, C. B. S.; MENEZES, R. S.; XIMENES, T. S.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Estoque de carbono e agregação do solo sob fragmentos florestais nos biomas Mata Atlântica e Cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 53, p. 97-116, 2019.

PATRA, S.; JULICH, S.; FEGER, K. H.; JAT, M. L.; JAT, H.; SHARMA, P. C.; SCHWÄRZEL, K. Soil hydraulic response to conservation agriculture under irrigated intensive cereal-based cropping systems in a semiarid climate. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 151-163, 2019.

QIU, K.; XIE, Y.; XU, D.; POTT, R. Ecosystem functions including soil organic carbon, total nitrogen and available potassium are crucial for vegetation recovery. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 7607, 2018.

REGO, A. A. R. M.; OLIVEIRA, P. S. R.; PIANO, J. T.; ROSSET, J. S.; EGEWART, J. F.; MATTEI, E.; SAMPAIO, M. C.; HER-

- RERA, J. L. Organic matter fractions and carbon management index in Oxisol under integrated agricultural production systems. **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, n. 3, p. 237-256, 2020.
- ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J. S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 2, p. 333-351, 2014.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 6, suplemento 3, p. 3443-3460, 2019.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M.; SEIDEL, E. P. Carbon stock, chemical and physical properties of soils under management systems with different deployment times in western region of Paraná, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 6, p. 3053-3072, 2014.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1529-1538, 2016.
- SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2018.
- SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.
- SANTOS, C. A.; REZENDE, C. D. P.; PINHEIRO, É. F. M.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**, v. 337, p. 394-401, 2019.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.
- SEMADE - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Econômico. Estudo da Dimensão Territorial do Estado de Mato Grosso do Sul: Regiões de Planejamento. Governo do Estado de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2015. 91p.
- SIGNOR, D.; DEON, M. D. I.; CAMARGO, P. B. D.; CERRI, C. E. P. Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. **Scientia Agrícola**, v. 75, n. 3, p. 225-232, 2018.
- SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 253-260, 2001.
- SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 842-847, 2006.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.
- SMITH, S. W.; ROSS, K.; KARLSSON, S.; BOND, B.; UPSON, R.; DAVEY, A. Going native, going local: revegetating eroded soils on the Falkland Islands using native seeds and farmland waste. **Restoration ecology**, v. 26, n. 1, p. 134-144, 2018.

WADE, J.; CULMAN, S. W.; HURISSO, T. T.; MILLER, R. O.; BAKER, L.; HORWATH, W. R. Sources of variability that compromise mineralizable carbon as a soil health indicator. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, p. 243-252, 2017.

WARD, S. E.; SMART, S. M.; QUIRK, H.; TALLOWIN, J. R. B.; MORTIMER, S. R.; SHIEL, R. S.; WILBY, A.; BARDGET, R. D. Legacy effects of grassland management on soil carbon to depth. **Global Change Biology**, v. 22, n. 8, p. 2929-2931, DOI: 10.1111/gcb.13246, 2016.

YEOMANS, A.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication Soil Science Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.