

AGREGAÇÃO DO SOLO, ESTABILIDADE ESTRUTURAL E CONSERVAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO EM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO BRASILEIRO

Isaias da Silva Pereira¹

RESUMO: Os sistemas de manejo modificam os processos de agregação do solo e influenciam diretamente a conservação da matéria orgânica e a estabilidade estrutural dos Latossolos. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência de diferentes sistemas de manejo sobre a agregação do solo, a estabilidade estrutural e a conservação do carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro sob Cerrado. Foram avaliados os sistemas Cerrado sensu stricto, Eucalipto, Pastagem, Plantio Direto, Grade Pesada e Arado de Disco. A estabilidade estrutural foi determinada pelo método de peneiramento úmido de Yoder, utilizando o diâmetro médio ponderado (DMP) e a distribuição dos macroagregados como indicadores estruturais. Os teores de carbono orgânico foram determinados pelo método de Mebius. A Pastagem apresentou os maiores percentuais de macroagregados, enquanto os maiores valores de DMP ocorreram no Cerrado sensu stricto. Os maiores teores de carbono orgânico foram observados no Cerrado sensu stricto e no Plantio Direto. As correlações entre DMP e macroagregados variaram de 0,83 a 0,99, evidenciando forte associação entre agregação e estabilidade estrutural. A ausência de correlação significativa entre argila e macroagregados demonstrou que a textura não constituiu o principal fator controlador da agregação. Os resultados indicam que a estabilidade estrutural foi mais dependente da matéria orgânica e dos processos biológicos associados ao manejo do que dos teores de argila. A conservação do carbono orgânico ocorreu pela atuação conjunta de mecanismos de proteção física promovidos pelos agregados e de mecanismos de proteção organomineral associados à fração mineral do solo. Os resultados demonstram que a estabilidade estrutural dos Latossolos foi mais dependente da matéria orgânica e dos processos biológicos associados ao manejo do que da textura do solo, destacando o papel dos sistemas conservacionistas na manutenção da qualidade edáfica dos Cerrados.

Palavras-chave: Agregação do solo. Diâmetro médio ponderado. Matéria orgânica. Carbono orgânico. Latossolo. Cerrado.

¹ Doutor em Engenharia Civil - Universidade Federal de Viçosa. Sanitária e Ambiental. Professor do Colégio Técnico de Floriano da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

ABSTRACT: Management systems modify soil aggregation processes and directly influence organic matter conservation and structural stability in Oxisols. This study evaluated the influence of different management systems on soil aggregation, structural stability and organic carbon conservation in a Dark Red Oxisol under Brazilian Cerrado conditions. The evaluated systems were native Cerrado, Eucalyptus plantation, Pasture, No-Tillage, Heavy Disk Harrow and Disk Plow. Structural stability was determined by the wet sieving method proposed by Yoder, using mean weight diameter (MWD) and macroaggregate distribution as structural indicators. Organic carbon contents were determined using the Mebius method. Pasture presented the highest percentages of macroaggregates, whereas the highest MWD values were observed in native Cerrado. The highest organic carbon contents occurred in native Cerrado and No-Tillage. Correlations between MWD and macroaggregates ranged from 0.83 to 0.99, indicating a strong relationship between aggregation and structural stability. The absence of significant correlations between clay content and macroaggregates demonstrated that soil texture was not the main controlling factor of aggregation. The results indicate that structural stability depended more on organic matter and biological processes associated with management than on clay content. Organic carbon conservation resulted from the combined action of physical protection mechanisms provided by aggregates and organomineral protection mechanisms associated with the mineral fraction of the soil.

Keywords: Soil aggregation. Mean weight diameter. Organic matter. Organic carbon. Oxisol. Cerrado.

RESUMEN: Los sistemas de manejo modifican los procesos de agregación del suelo e influyen directamente en la conservación de la materia orgánica y en la estabilidad estructural de los Oxisoles. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de diferentes sistemas de manejo sobre la agregación del suelo, la estabilidad estructural y la conservación del carbono orgánico en un Latosol Rojo Oscuro bajo condiciones de Cerrado brasileño. Se evaluaron los sistemas Cerrado sensu stricto, Eucalipto, Pastura, Siembra Directa, Rastra Pesada y Arado de Discos. La estabilidad estructural se determinó mediante el método de tamizado húmedo de Yoder, utilizando el diámetro medio ponderado (DMP) y la distribución de macroagregados como indicadores estructurales. Los contenidos de carbono orgánico se determinaron mediante el método de Mebius. La Pastura presentó los mayores porcentajes de macroagregados, mientras que los mayores valores de DMP se observaron en el Cerrado sensu stricto. Los mayores contenidos de carbono orgánico ocurrieron en el Cerrado sensu stricto y en la Siembra Directa. Las correlaciones entre DMP y macroagregados variaron de 0,83 a 0,99, evidenciando una fuerte asociación entre agregación y estabilidad estructural. La ausencia de correlación significativa entre arcilla y macroagregados demostró que la textura no constituyó el principal factor controlador de la agregación. Los resultados indican que la estabilidad estructural dependió más de la materia orgánica y de los procesos biológicos asociados al manejo que del contenido de arcilla. La conservación del carbono orgánico ocurrió por la acción conjunta de mecanismos de protección física promovidos por los agregados y mecanismos de protección organomineral asociados a la fracción mineral del suelo.

Palabras clave: Agregación del suelo. Diámetro medio ponderado. Materia orgânica. Carbono orgânico. Oxisol. Cerrado.

I INTRODUÇÃO

O solo constitui um sistema dinâmico cuja capacidade de sustentar a produção vegetal depende da interação entre atributos físicos, químicos e biológicos. Entre esses atributos, a estrutura do solo assume papel fundamental por influenciar diretamente a infiltração e o armazenamento de água, a aeração, o crescimento radicular, a ciclagem de nutrientes e a resistência aos processos erosivos. A degradação da estrutura compromete essas funções, reduzindo a capacidade produtiva e aumentando a vulnerabilidade dos agroecossistemas às variações climáticas e ao uso intensivo da terra.

A agregação representa um dos principais indicadores da qualidade estrutural do solo. Os agregados são unidades estruturais formadas pela associação entre partículas minerais e compostos orgânicos, cuja estabilidade determina a resistência do solo à ação desagregadora da água e ao impacto das práticas de manejo. Em ambientes tropicais, especialmente nos Latossolos, a formação e a estabilização dos agregados resultam da interação entre raízes, microrganismos, matéria orgânica e constituintes minerais do solo (TISDALL; OADES, 1982). Dessa forma, alterações promovidas pelos sistemas de manejo afetam diretamente os processos de agregação e desagregação, modificando a organização estrutural do perfil.

A matéria orgânica desempenha papel central nesse processo. Além de atuar como agente cimentante dos agregados, contribui para a retenção de água, fornece energia para a biota do solo e participa da formação dos complexos organominerais responsáveis pela estabilização do carbono (STEVENSON, 1994; SIX et al., 2002). Nos Latossolos altamente intemperizados, caracterizados pelo predomínio de minerais de baixa atividade química, a matéria orgânica também constitui importante fonte de cargas negativas, influenciando diretamente a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes para as plantas (BRADY; WEIL, 2017). Assim, a conservação dos estoques de carbono orgânico está associada não apenas à fertilidade química, mas também à manutenção da qualidade física do solo.

Os sistemas de manejo exercem forte influência sobre a dinâmica da matéria orgânica e sobre a estabilidade estrutural. Sistemas conservacionistas, caracterizados pela manutenção da cobertura vegetal e pela redução do revolvimento do solo, tendem a favorecer a formação de agregados estáveis e a conservação do carbono orgânico. Em contraste, sistemas submetidos ao preparo convencional promovem a ruptura dos agregados, aumentam a exposição da matéria orgânica à decomposição microbiana e aceleram os processos de degradação física. Em áreas de

Cerrado, diversos estudos demonstram que a adoção de sistemas conservacionistas favorece o acúmulo de carbono orgânico e melhora a qualidade estrutural do solo (RESCK et al., 2000; BAYER et al., 2006).

Nos Latossolos dos Cerrados brasileiros, a conservação do carbono orgânico resulta da atuação simultânea de mecanismos de proteção física, associados à agregação do solo, e de mecanismos de proteção organomineral decorrentes da interação entre compostos orgânicos e a fração mineral. Esses mecanismos controlam a persistência da matéria orgânica no solo e sua resistência à decomposição ao longo do tempo (SIX et al., 2002; VON LÜTZOW et al., 2006). Compreender a contribuição desses mecanismos sob diferentes sistemas de manejo é fundamental para explicar as relações entre estabilidade estrutural, conservação da matéria orgânica e qualidade do solo.

Apesar da ampla literatura sobre matéria orgânica e agregação em Latossolos, ainda são limitadas as interpretações integradas que relacionam simultaneamente estabilidade estrutural, conservação do carbono e mecanismos de proteção organomineral sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados brasileiros.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes sistemas de manejo sobre a agregação do solo, a estabilidade estrutural e a conservação do carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro sob Cerrado, utilizando a distribuição dos macroagregados, o diâmetro médio ponderado e os teores de carbono orgânico como indicadores dos mecanismos de estabilização da matéria orgânica e da qualidade do solo.

4

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e sistemas de manejo

O estudo foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Escuro localizado na região dos Cerrados do Brasil Central. Foram avaliados seis sistemas de manejo representativos de diferentes níveis de intervenção antrópica: Cerrado sensu stricto (CE), Eucalipto (EUC), Pastagem (PAST), Plantio Direto (PD), Grade Pesada (GP) e Arado de Disco (AD).

O sistema Cerrado sensu stricto foi utilizado como referência das condições naturais do solo, sem histórico de revolvimento mecânico. O sistema Eucalipto era composto por povoamento florestal estabelecido sobre área anteriormente ocupada por vegetação nativa. A Pastagem encontrava-se sob cobertura permanente de gramíneas, com predominância de

Brachiaria spp. O Plantio Direto caracterizava-se pela ausência de preparo mecânico e manutenção dos resíduos culturais na superfície. O sistema Grade Pesada correspondia a uma área anteriormente submetida ao preparo convencional e mantida em pousio por aproximadamente dois anos sob cobertura de *Brachiaria decumbens*. O sistema Arado de Disco representava a condição de maior intensidade de revolvimento do solo.

Os dados utilizados neste estudo são oriundos da dissertação de mestrado desenvolvida por Pereira (1997), sendo reinterpretados neste trabalho sob a perspectiva da agregação do solo, da estabilidade estrutural e dos mecanismos de estabilização do carbono orgânico em diferentes sistemas de manejo.

2.2 Amostragem do solo

As amostras de solo foram coletadas em cinco profundidades: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm. Em cada sistema de manejo foram coletadas cinco repetições, totalizando 150 amostras para caracterização física, química e avaliação da estabilidade estrutural.

As amostras destinadas às análises físicas e químicas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Para as análises de agregação foram coletados blocos indeformados, preservando a estrutura natural do solo.

5

2.3 Caracterização física e química do solo

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) como dispersante químico e agitação mecânica, conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). Foram determinados os teores de argila, silte, areia fina, areia grossa e argila naturalmente dispersa.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme EMBRAPA (1997). O pH foi determinado potenciometricamente em água e em solução de KCl. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por titulação com EDTA. O alumínio trocável (Al^{3+}) foi determinado após extração com KCl 1 mol L^{-1} e titulação com NaOH. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi determinada conforme procedimentos descritos pela EMBRAPA (1997). O potássio trocável foi extraído pelo método Mehlich-1 e determinado por fotometria de chama. A capacidade de troca catiônica (CTC) foi calculada pela soma das bases trocáveis e da acidez potencial.

2.4 Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados foi determinada pelo método de peneiramento úmido proposto por Yoder (1936) e posteriormente aperfeiçoado por Kemper; Chepil (1965). Foram utilizadas amostras contendo agregados com diâmetro inferior a 8 mm. Cem gramas de solo foram distribuídos em um conjunto de peneiras com malhas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,106 mm, submetidas à oscilação vertical em água durante 30 minutos.

Após o peneiramento, o material retido em cada peneira foi seco em estufa a 40 °C por 48 horas e pesado para determinação da distribuição das classes de agregados. Foram considerados macroagregados os agregados retidos em peneiras com abertura igual ou superior a 0,25 mm e microagregados aqueles compreendidos entre 0,106 e 0,25 mm.

A estabilidade estrutural foi avaliada pelo diâmetro médio ponderado (DMP), calculado segundo a expressão:

$$DMP = \sum (X_i \cdot W_i)$$

em que, X_i corresponde ao diâmetro médio de cada classe de agregados e W_i à proporção de massa retida em cada peneira.

2.5 Determinação do carbono orgânico

Os teores de carbono orgânico do solo foram determinados pelo método de oxidação úmida descrito por Mebius (1960). Amostras de solo previamente moídas e passadas em peneira de 100 mesh foram submetidas à digestão com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) e ácido sulfúrico concentrado sob aquecimento. Após a digestão, o excesso de dicromato foi titulado com sulfato ferroso amoniacal, sendo os resultados expressos em $dag\ kg^{-1}$ de carbono orgânico.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e à análise de regressão polinomial em profundidade utilizando o programa Profile. Foram avaliados os efeitos linear, quadrático e cúbico das profundidades sobre os atributos físicos, químicos e estruturais do solo. Também foram realizadas análises de correlação entre os teores de carbono orgânico, macroagregados, diâmetro médio ponderado e argila, visando identificar os principais mecanismos associados à estabilidade estrutural e à conservação do carbono orgânico nos diferentes sistemas de manejo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização física e química dos sistemas de manejo

A capacidade de troca catiônica (CTC) variou de 7,42 a 11,04 cmolc dm^{-3} , com o maior valor registrado no sistema Plantio Direto (11,04 cmolc dm^{-3}). Esse resultado reflete a maior capacidade desse sistema em conservar carbono orgânico na camada superficial, associada à manutenção dos resíduos culturais na superfície e à correção da acidez do solo.

Nos Latossolos, solos altamente intemperizados e caracterizados pela intensa perda de sílica e bases ao longo dos processos pedogenéticos, a matéria orgânica assume papel fundamental como fonte de cargas negativas. Nesses ambientes, a capacidade de retenção de nutrientes depende fortemente de sua presença e da correção da acidez do solo, uma vez que tanto os colóides orgânicos quanto parte dos constituintes minerais apresentam cargas dependentes do pH. Assim, sistemas capazes de conservar maiores teores de matéria orgânica tendem a apresentar maior capacidade de troca catiônica e maior eficiência na retenção e disponibilização de nutrientes às plantas.

Os menores valores de densidade do solo foram observados nos sistemas Eucalipto (0,85 Mg m^{-3}) e Cerrado sensu stricto (0,93 Mg m^{-3}), indicando melhor estruturação, maior volume de poros e menor grau de compactação. Em oposição, o sistema Arado de Disco apresentou a maior densidade (1,09 Mg m^{-3}), evidenciando os efeitos do preparo convencional sobre a degradação da estrutura física do solo. O revolvimento promove a ruptura dos agregados, reduz a continuidade dos poros e aumenta o adensamento das partículas, comprometendo a infiltração de água, favorecendo o escoamento superficial e ampliando a susceptibilidade à erosão.

Embora os sistemas apresentem diferenças relativamente pequenas nos atributos químicos por se tratar de uma mesma ordem de solo, sob o mesmo material de origem, as variações observadas na densidade foram significativas, demonstrando que os efeitos dos sistemas de manejo manifestaram-se mais intensamente sobre a estrutura física do solo do que sobre seus atributos químico. Os sistemas Cerrado sensu stricto e Eucalipto mantiveram melhores condições estruturais devido à ausência de revolvimento e ao aporte contínuo de resíduos vegetais. Esse comportamento evidencia que a qualidade física do solo depende fortemente da manutenção dos processos biológicos responsáveis pela formação e estabilização dos agregados.

Apesar da elevada acidez e dos maiores teores de alumínio trocável observados no Cerrado sensu stricto, esse sistema apresentou posteriormente elevados níveis de estabilidade estrutural e conservação do carbono orgânico. Esse resultado demonstra que a qualidade física do solo não depende exclusivamente da fertilidade química imediata, mas da continuidade dos processos de ciclagem da matéria orgânica e da atividade biológica que sustentam a formação da estrutura do solo.

3.2 Sistemas de manejo e estabilidade estrutural do solo

Os sistemas de manejo influenciaram significativamente a distribuição dos macroagregados e a estabilidade estrutural do Latossolo Vermelho-Escuro estudado. A distribuição dos macroagregados (Figura 1) e os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) (Figura 2) evidenciam que a intensidade do revolvimento, o aporte de resíduos vegetais e a atividade biológica foram determinantes para a manutenção da estrutura do solo.

O diâmetro médio ponderado constitui um dos principais indicadores da estabilidade estrutural, pois expressa simultaneamente o tamanho e a resistência dos agregados à ruptura em água. Quanto maior o DMP, maior a proporção de agregados estáveis e maior a resistência da estrutura do solo à ação erosiva da água. Dessa forma, o DMP permite avaliar não apenas a presença dos agregados, mas sua persistência frente aos processos de degradação física.

A Pastagem apresentou elevada agregação e altos níveis de estabilidade estrutural, embora os maiores valores de DMP tenham sido observados no Cerrado sensu stricto (Figura 2), resultado associado ao intenso desenvolvimento radicular das gramíneas e à elevada renovação de raízes. O aporte contínuo de resíduos orgânicos, associado à atividade microbiana estimulada pela rizosfera, favoreceu a formação dos agregados e a organização estrutural do solo. Como consequência, esse sistema apresentou elevada estabilidade estrutural e maior proteção física da matéria orgânica.

Esse resultado demonstra que agregação e estabilidade estrutural não representam exatamente o mesmo atributo físico. Enquanto a Pastagem favoreceu a formação de agregados, o Cerrado favoreceu a formação de agregados mais resistentes à ação da água. Isso sugere que a estabilidade estrutural depende não apenas da quantidade de agregados presentes no solo, mas também da qualidade das ligações físicas, químicas e biológicas responsáveis por sua estabilização.

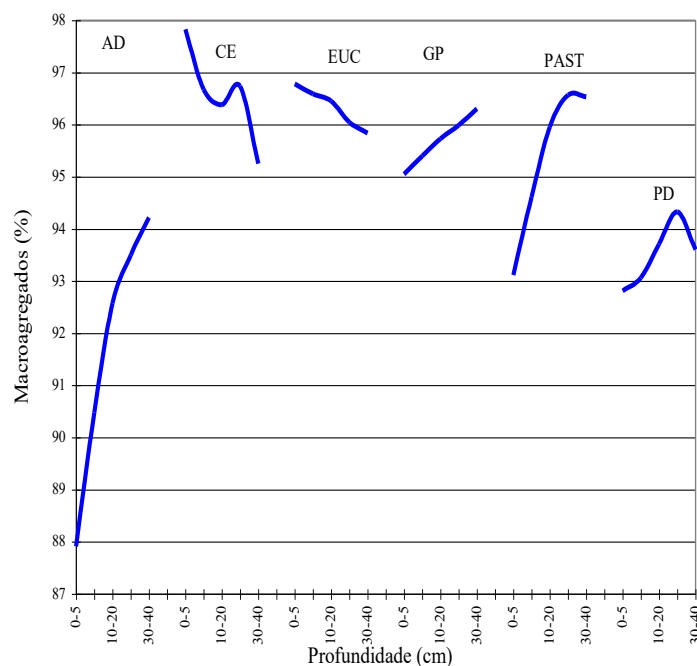


Figura 1. Distribuição dos macroagregados nos diferentes sistemas de manejo.

Os resultados observados corroboram o modelo hierárquico de agregação proposto por Tisdall e Oades (1982), segundo o qual raízes, hifas fúngicas e compostos orgânicos atuam como agentes responsáveis pela formação e estabilização dos macroagregados. Nessa perspectiva, a manutenção da cobertura vegetal favorece a continuidade dos processos biológicos que sustentam a estabilidade estrutural do solo.

O Cerrado sensu stricto e o Eucalipto também apresentaram elevados percentuais de macroagregados e altos valores de DMP (Figura 2), demonstrando que a cobertura vegetal permanente e a ausência de revolvimento favorecem a preservação da estrutura ao longo do tempo. Nesses sistemas, os processos de agregação superam os processos de desagregação, permitindo a formação de estruturas mais resistentes e persistentes.

O sistema Grade Pesada apresentou um dos resultados mais expressivos do estudo. Apesar do histórico de intenso revolvimento, aproximadamente dois anos de pousio sob cobertura de *Brachiaria decumbens* foram suficientes para promover recuperação significativa da estrutura do solo.

Os valores de macroagregação e DMP aproximaram-se daqueles observados nos sistemas conservacionistas, evidenciando a elevada capacidade de resiliência estrutural dos

Latossolos quando cessam as perturbações mecânicas e são restabelecidos os processos biológicos responsáveis pela agregação.

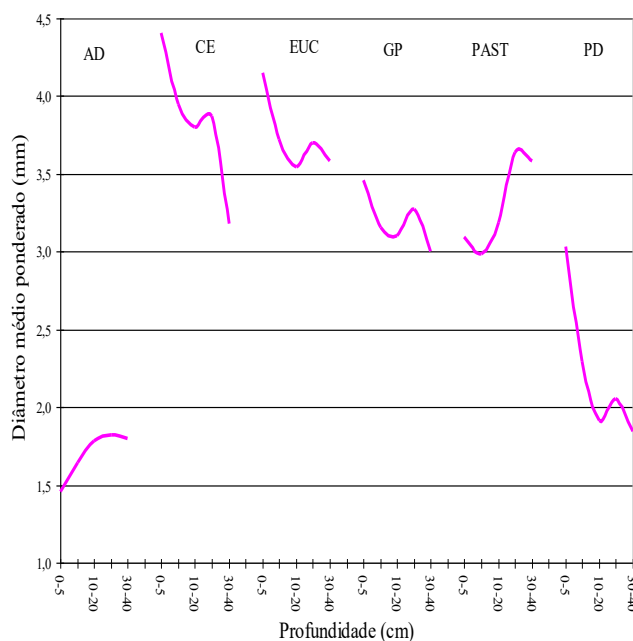


Figura 2. Comportamento do diâmetro médio ponderado (DMP) dos macroagregados nos diferentes sistemas de manejo.

Em contraste, o sistema Arado de Disco apresentou os menores percentuais de macroagregados e os menores valores de DMP. O revolvimento constante rompe os agregados, reduz a proteção física da matéria orgânica e favorece a degradação estrutural. Como consequência, ocorre redução da infiltração de água, aumento da erosão e maior vulnerabilidade do solo aos processos de degradação física.

3.3 Carbono orgânico e reservatórios de carbono nos sistemas de manejo

Os teores de carbono orgânico diminuíram com a profundidade em todos os sistemas avaliados (Figura 3), refletindo a concentração dos aportes de resíduos vegetais e da atividade biológica nas camadas superficiais do solo. Os maiores teores médios foram observados no Cerrado sensu stricto e no Plantio Direto ($2,27 \text{ dag kg}^{-1}$), seguidos pela Pastagem ($2,16 \text{ dag kg}^{-1}$). Os menores valores ocorreram nos sistemas Arado de Disco, Eucalipto e Grade Pesada ($1,86 \text{ dag kg}^{-1}$).

Os resultados demonstram que os sistemas submetidos a menor perturbação física apresentaram maior capacidade de conservar os reservatórios de carbono orgânico do solo. No

Cerrado sensu stricto, o aporte contínuo de resíduos vegetais, associado à ausência de revolvimento e à elevada diversidade biológica, favoreceu o acúmulo e a estabilização da matéria orgânica ao longo do tempo, corroborando os resultados apresentados por Resck et al. (2000).

O Plantio Direto destacou-se como o sistema agrícola mais eficiente na conservação do carbono orgânico. A manutenção da palhada na superfície reduz a amplitude térmica, diminui as perdas por erosão e limita a exposição da matéria orgânica aos microrganismos decompositores. Como resultado, uma parcela maior do carbono permanece armazenada no solo.

Os menores teores observados no Arado de Disco e na Grade Pesada evidenciam os efeitos do preparo convencional sobre a dinâmica da matéria orgânica. A ruptura dos agregados expõe compostos orgânicos anteriormente protegidos no interior das estruturas do solo, favorecendo a oxidação e acelerando a mineralização do carbono. Em ambientes tropicais, onde as temperaturas elevadas estimulam a atividade microbiana durante grande parte do ano, esse processo tende a ocorrer com maior intensidade.

A comparação entre as Figuras 1 e 3 demonstra que a formação de macroagregados, isoladamente, não explica a conservação do carbono orgânico. Embora a Pastagem tenha apresentado os maiores percentuais de macroagregados, os maiores teores de carbono ocorreram no Cerrado sensu stricto e no Plantio Direto. Esse comportamento sugere que mecanismos adicionais de estabilização da matéria orgânica atuaram nos sistemas avaliados.

11

3.4 Agregação e proteção organomineral dos reservatórios de carbono orgânico do solo

As correlações observadas permitem compreender os mecanismos responsáveis pela estabilização do carbono orgânico nos diferentes sistemas de manejo. As elevadas correlações entre o diâmetro médio ponderado (DMP) e os macroagregados, variando de 0,83 a 0,99, demonstram que a estabilidade estrutural esteve diretamente associada à formação e à manutenção dos agregados do solo. Esses resultados indicam que a agregação exerceu importante papel na conservação do carbono orgânico ao promover proteção física da matéria orgânica contra a ação dos microrganismos decompositores. Quanto maior a estabilidade dos agregados, maior a capacidade do solo em preservar compostos orgânicos no interior de suas estruturas.

Entretanto, a ausência de correlação significativa entre os teores de argila e os macroagregados demonstra que a textura não constituiu o principal fator controlador da agregação nos sistemas avaliados. Apesar da amplitude textural observada, com teores de argila variando entre 410 e 716 g kg⁻¹, as diferenças na estabilidade estrutural foram explicadas principalmente pelo manejo adotado e pela dinâmica da matéria orgânica. Esse resultado sugere que a ação das raízes, da microbiota do solo e dos compostos orgânicos associados ao manejo exerceu maior influência sobre a agregação do que a própria composição granulométrica do solo.

A comparação entre os resultados de macroagregação, DMP e carbono orgânico reforça essa interpretação. Embora a Pastagem tenha apresentado os maiores percentuais de macroagregados, os maiores teores de carbono orgânico foram observados no Cerrado sensu stricto e no Plantio Direto. Esse comportamento demonstra que a formação de agregados, isoladamente, não explica a conservação da matéria orgânica, indicando a atuação simultânea de outros mecanismos de estabilização do carbono.

Os resultados sugerem que a conservação do carbono orgânico ocorreu pela atuação complementar de mecanismos de proteção física e organomineral. A proteção física foi promovida pela incorporação da matéria orgânica ao interior dos agregados, reduzindo sua exposição à decomposição. Paralelamente, a proteção organomineral resultou da interação entre compostos orgânicos e a fração mineral do solo, especialmente caulinita e óxidos de ferro e alumínio, componentes predominantes nos Latossolos altamente intemperizados. A atuação conjunta desses mecanismos contribuiu para a maior conservação do carbono observada nos sistemas Cerrado sensu stricto e Plantio Direto.

Os maiores valores de capacidade de troca catiônica foram observados justamente nos sistemas que apresentaram maiores teores de carbono orgânico. Esse comportamento sugere a contribuição da matéria orgânica para a geração de cargas negativas e para a retenção de nutrientes no solo. Além de participar da estabilização estrutural, a matéria orgânica atuou como importante componente da fertilidade química, integrando atributos físicos e químicos do solo em um mesmo processo de conservação.

Esses resultados corroboram os mecanismos de estabilização da matéria orgânica descritos por Six et al. (2002) e von Lützow et al. (2006), segundo os quais a persistência do carbono nos solos depende da atuação simultânea da proteção física promovida pelos agregados e da proteção organomineral associada às superfícies minerais. Nos Latossolos dos Cerrados, a

matéria orgânica mostrou-se o principal elo entre a estabilidade estrutural, a conservação do carbono e a manutenção da qualidade química do solo.

4 CONCLUSÕES

Os sistemas de manejo modificaram significativamente a agregação, a estabilidade estrutural e os teores de carbono orgânico do Latossolo Vermelho-Escuro estudado. Os maiores percentuais de macroagregados foram observados na Pastagem, enquanto os maiores valores de diâmetro médio ponderado ocorreram no Cerrado sensu stricto, demonstrando que quantidade de agregados e estabilidade estrutural representam atributos distintos da qualidade física do solo.

O Cerrado sensu stricto e o Plantio Direto apresentaram os maiores teores de carbono orgânico, evidenciando maior eficiência na conservação dos reservatórios de carbono do solo. A comparação entre os resultados de agregação e carbono demonstrou que a estabilização da matéria orgânica não foi explicada exclusivamente pela formação de macroagregados, mas da atuação simultânea de mecanismos de proteção física e organomineral.

As elevadas correlações entre diâmetro médio ponderado e macroagregados confirmaram que a estabilidade estrutural esteve diretamente associada à manutenção da estrutura do solo. Em contrapartida, a ausência de correlação significativa entre argila e macroagregados demonstrou que a textura não constituiu o principal fator controlador da agregação, sendo a matéria orgânica e os processos biológicos associados ao manejo os principais responsáveis pela estabilidade estrutural observada.

Os maiores valores de capacidade de troca catiônica foram observados nos sistemas que apresentaram maiores teores de carbono orgânico, sugerindo a contribuição da matéria orgânica para a geração de cargas negativas e para a retenção de nutrientes. Esses resultados indicam que a matéria orgânica atuou simultaneamente como reservatório de carbono, agente estabilizador dos agregados e importante componente da fertilidade química do solo.

A recuperação estrutural observada na área submetida à Grade Pesada seguida de pousio demonstrou a elevada capacidade de resiliência dos Latossolos dos Cerrados. Após aproximadamente dois anos sem revolvimento e sob cobertura de *Brachiaria decumbens*, os indicadores estruturais aproximaram-se daqueles observados nos sistemas conservacionistas, evidenciando o potencial da regeneração natural na restauração da qualidade física do solo.

O autor agradece à **Universidade de Brasília (UnB)**, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela formação científica e pelas condições acadêmicas que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa. À **Embrapa Cerrados**, pela disponibilização da infraestrutura experimental e laboratorial, pelo apoio técnico e científico e pela oportunidade de realização das atividades de campo e das análises que fundamentaram este estudo. Ao **Professor Dr. Dimas Vital Siqueira Resck**, orientador desta pesquisa, pela orientação segura, pelo rigor científico, pelas discussões que contribuíram para a interpretação dos resultados e pela formação acadêmica proporcionada ao longo do desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; PAVINATO, A. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 237-245, 2006.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. Part 1, p. 499-510.

MEBIUS, L. J. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. *Analytica Chimica Acta*, Amsterdam, v. 22, p. 120-124, 1960.

PEREIRA, I. S. Efeito de diferentes sistemas de manejo na distribuição de macro e microagregados e nos teores de carbono orgânico em um Latossolo Vermelho-Escuro na região dos Cerrados. 1997. 160 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1997.

RESCK, D. V. S.; VASCONCELLOS, C. A.; VILELA, L.; MACEDO, M. C. M. Impacto dos sistemas de uso e manejo na matéria orgânica de solos dos Cerrados. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (org.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, 2000. p. 269-278.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 241, n. 2, p. 155-176, 2002.

STEVENSON, F. J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 512 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science, Oxford*, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

VON LÜTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science, Oxford*, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy, Madison*, v. 28, n. 5, p. 337-351, 193