

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (PPGAGRO)

VITOR BATISTA PEREIRA CAETANO

ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO

UBERLÂNDIA
2026

VITOR BATISTA PEREIRA CAETANO

**ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO
EM SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Produção Vegetal
Orientadora: Profa. Dra. Araújo Hulmann Batista

Coorientador: Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres

UBERLÂNDIA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C128a Caetano, Vitor Batista Pereira, 1995-
2026 Alterações dos atributos físicos e estoque de carbono do solo em
diferentes sistemas de manejo no cerrado [recurso eletrônico] / Vitor
Batista Pereira Caetano. - 2026.

Orientadora: Araújo Hulmann Batista.
Coorientador: José Luiz Rodrigues Torres.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.10022>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

I. Agronomia. I. Batista, Araújo Hulmann, 1977-, (Orient.). II.
Torres, José Luiz Rodrigues, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

Nelson Marcos Ferreira
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3074

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e discernimento ao longo desta trajetória.

À minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos durante o todo o período de pós-graduação.

Aos professores, em especial à minha orientadora, Prof. Dra. Araújo Hulmann Batista e coorientador, Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres pelos ensinamentos, orientações e contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, do Instituto de Ciências Agrárias pela oportunidade de formação acadêmica.

Aos técnicos dos laboratórios que com paciência e dedicação foram fundamentais para o processo de análise de todas as minhas amostras coletadas no campo.

Por fim, agradeço à minha companheira e amigos da jornada acadêmica, pelo apoio no processo de coleta de amostras, paciência e incentivo durante todo o período de pós-graduação.

A TODOS, MEU MUITO OBRIGADO!

“O conhecimento prévio não se obtém por conjecturas, mas pela análise criteriosa das condições e pela compreensão profunda da realidade.”

(Sun Tzu, A Arte da Guerra)

RESUMO

A conversão de áreas naturais do Cerrado para sistemas agrícolas tem promovido alterações nos atributos físicos do solo e na dinâmica do carbono orgânico, podendo afetar a manutenção da estrutura do solo, a disponibilidade de água e o armazenamento de carbono nos ambientes cultivados. Este trabalho avaliou os efeitos de diferentes sistemas de manejo da cultura da cana-de-açúcar sobre os atributos físicos do solo e os estoques de carbono orgânico em Latossolo Vermelho, na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais. Avaliaram-se seis sistemas de uso e manejo do solo: Conv. 2 (cultivo convencional com dois anos), Conv. 3 (cultivo convencional com três anos), Cult. Min. 2 (cultivo mínimo com dois anos), Cult. Min. 3 (cultivo mínimo com três anos), Pastagem e Mata Nativa como referência ambiental. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm e submetidas às análises de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados, carbono orgânico total e estoque de carbono. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, com seis sistemas de manejo, três profundidades e cinco repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. O manejo apresentou maior influência sobre os atributos avaliados, enquanto a profundidade e a interação entre manejo e profundidade apresentaram menor efeito sobre a maioria das variáveis analisadas. O sistema Cult. Min. 3 apresentou condições físicas mais favoráveis, caracterizadas por menor densidade do solo, maior macroporosidade (24,17%) e maior porosidade total (47,93%), apresentando comportamento semelhante à Mata Nativa. Os atributos relacionados à estabilidade de agregados evidenciaram maior preservação estrutural nos sistemas Pastagem e Mata Nativa, representados pelos maiores valores de diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade de agregados, demonstrando a importância da cobertura vegetal permanente e do aporte contínuo de resíduos orgânicos. Os sistemas de manejo também influenciaram os teores de carbono orgânico total, com maiores valores observados nos sistemas Cult. Min. 2, Conv. 2 e Cult. Min. 3. O estoque de carbono foi influenciado pelos sistemas avaliados, destacando-se o Cult. Min. 3 com o maior valor observado (43,40 Mg ha⁻¹), seguido pela Pastagem e Mata Nativa. Conclui-se que sistemas de manejo conservacionistas, especialmente o cultivo mínimo com três anos de implantação, apresentam potencial para favorecer a melhoria da qualidade física do solo e o aumento dos estoques de carbono em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Cerrado, contribuindo para estratégias de sustentabilidade agrícola e conservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: Atributos físicos do solo; carbono orgânico total; cultivo mínimo; estoque de carbono.

ABSTRACT

The conversion of native Cerrado areas into agricultural systems has promoted changes in soil physical attributes and organic carbon dynamics, potentially affecting soil structure maintenance, water availability, and carbon storage capacity in cultivated environments. This study evaluated the effects of different sugarcane management systems on soil physical attributes and organic carbon stocks in Red Latosols in the Triângulo Mineiro region, Minas Gerais, Brazil. Six soil use and management systems were evaluated: Conv. 2 (conventional cultivation with two years of implementation), Conv. 3 (conventional cultivation with three years of implementation), Min. Till. 2 (minimum tillage with two years of implementation), Min. Till. 3 (minimum tillage with three years of implementation), Pasture, and Native Forest as an environmental reference. Soil samples were collected at depths of 0–10, 10–20, and 20–40 cm and analyzed for soil bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity, mean weight diameter, geometric mean diameter, aggregate stability index, total organic carbon, and carbon stocks. The experiment was conducted in a completely randomized design in a factorial arrangement, considering six management systems, three soil depths, and five replications. Data were subjected to analysis of variance, and means were compared using Tukey's test at a 5% significance level. The results demonstrated that management was the main factor responsible for changes in the evaluated attributes, whereas soil depth and the interaction between management and depth had a lower influence on most variables. The Min. Till. 3 system showed more favorable soil physical conditions, characterized by lower soil bulk density, higher macroporosity (24.17%), and higher total porosity (47.93%), presenting a similar behavior to Native Forest. The attributes related to aggregate stability showed greater structural preservation in Pasture and Native Forest systems, which presented higher values of geometric mean diameter, mean weight diameter, and aggregate stability index, highlighting the importance of permanent soil cover and continuous organic residue input. Management systems also influenced total organic carbon contents, with higher values observed in Min. Till. 2, Conv. 2, and Min. Till. 3 systems. Carbon stocks were affected by the evaluated management systems, with Min. Till. 3 presenting the highest carbon stock (43.40 Mg ha⁻¹), followed by Pasture and Native Forest. It is concluded that conservation management systems, especially minimum tillage after three years of implementation, have the potential to improve soil physical quality and increase carbon stocks in sugarcane cultivated areas in the Cerrado, contributing to agricultural sustainability strategies and natural resource conservation.

Keywords: soil quality; conservation management; soil physical attributes; organic carbon; sugarcane.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1	Local do estudo e coleta de amostras	11
2.2	Determinação dos pontos de coleta e delineamento experimental	15
2.3	Densidade aparente e porosidade do solo	16
2.4	Estabilidade de Agregados	18
2.5	Índice de Estabilidade de Agregados	19
2.6	Determinação do Carbono Orgânico Total (COT)	19
2.7	Determinação do Estoque de Carbono	19
2.8	Análise Estatística.....	20
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
3.1	Densidade Aparente do solo	21
3.2	Macro porosidade (Ma), Micro porosidade (Mi), Porosidade Total (PT) do solo	22
3.3	Diâmetro Médio Geométrico (DMG), Diâmetro Médio Ponderado (DMP)	24
3.4	Carbono Orgânico Total	25
3.5	Estoque de Carbono	27
4	CONCLUSÃO	30
5	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas representa uma das principais alterações antrópicas sobre os ambientes terrestres, promovendo modificações nos processos ecológicos e nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Essas alterações podem comprometer a capacidade do solo em desempenhar funções essenciais, como armazenamento de carbono, ciclagem de nutrientes, regulação hídrica e suporte à produção agrícola. Nesse contexto, a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) assume papel central, uma vez que influencia diretamente os fluxos de entrada e saída de carbono e está associada à sustentabilidade produtiva e ambiental dos sistemas agrícolas (Borges *et al.*, 2015; Barbosa, 2018).

O Brasil apresenta uma ampla diversidade de solos, resultado da interação entre fatores geológicos, climáticos e biológicos ao longo de milhares de anos. Entre as classes de maior ocorrência destacam-se os Latossolos, que representam aproximadamente 39% do território nacional (EMBRAPA, 2024). Esses solos apresentam características favoráveis à agricultura mecanizada, como elevada profundidade, boa drenagem e relevo predominantemente adequado ao cultivo em larga escala. Entretanto, devido ao intenso processo de intemperismo, apresentam limitações químicas naturais e baixos teores de matéria orgânica, tornando a adoção de práticas de manejo adequadas fundamental para a manutenção da qualidade do solo e da sustentabilidade dos sistemas produtivos (Souza, 2021).

Entre os biomas brasileiros, o Cerrado destaca-se pela sua relevância agrícola, sendo atualmente uma das principais regiões produtoras de grãos, fibras e bioenergia. A combinação entre características topográficas favoráveis, disponibilidade de áreas mecanizáveis e predominância de Latossolos favoreceu a intensa expansão agrícola nas últimas décadas. Entretanto, esse processo resultou em expressivas alterações na cobertura vegetal e nos serviços ecossistêmicos associados ao solo. Dados do MapBiomass indicam que, entre 1985 e 2024, aproximadamente 40,5 milhões de hectares de vegetação nativa do Cerrado foram convertidos, representando cerca de 28% da cobertura original do bioma, enquanto uma parcela significativa da área passou a ser ocupada por atividades agrícolas e pecuárias (MapBiomass, 2025).

A intensificação do uso agrícola pode ocasionar alterações na estrutura do solo, redução dos estoques de carbono orgânico e comprometimento de processos relacionados à qualidade ambiental. O carbono orgânico do solo (COS) apresenta importante função na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que representa um dos principais reservatórios terrestres de carbono e está diretamente relacionado aos fluxos de CO₂ entre solo e atmosfera. Estudos

recentes demonstram que a conversão da vegetação nativa do Cerrado para sistemas agrícolas pode resultar em reduções expressivas nos estoques de carbono, principalmente nas camadas superficiais do solo. Entretanto, avaliações realizadas em maiores profundidades indicam que sistemas agrícolas manejados adequadamente podem manter ou até aumentar os estoques de carbono ao longo do perfil, evidenciando a importância do manejo na dinâmica desse elemento (Carvalho *et al.*, 2022).

O estoque de carbono do solo constitui um importante indicador de qualidade, pois está associado à melhoria de atributos físicos, químicos e biológicos. Segundo Gazolla *et al.* (2022), maiores teores de matéria orgânica contribuem para a formação e estabilização de agregados, aumento da porosidade, melhoria da retenção de água e maior disponibilidade de nutrientes. Dessa forma, a manutenção da MOS representa um componente fundamental para a conservação da estrutura do solo e para o funcionamento adequado dos agro-ecossistemas.

Entre os atributos físicos influenciados pela dinâmica da matéria orgânica, a estabilidade dos agregados apresenta grande relevância, pois está diretamente relacionada à resistência do solo à erosão, à infiltração de água e ao desenvolvimento radicular. A formação e estabilização dos agregados ocorre principalmente pela ação de compostos orgânicos e pela atividade biológica, que promovem a união das partículas minerais e aumentam sua proteção contra processos de degradação. Por outro lado, sistemas de manejo intensivos, caracterizados pelo revolvimento frequente do solo e baixa reposição de resíduos orgânicos podem favorecer a ruptura dos agregados, aumento da densidade e redução da porosidade (Six *et al.*, 2004).

No contexto da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), uma das culturas mais importantes do Brasil para produção de açúcar, etanol e bioenergia, a adoção de práticas conservacionistas e o uso racional de resíduos orgânicos da indústria sucroenergética - como vinhaça, torta de filtro e cinzas de caldeira - têm sido apontados como estratégias capazes de melhorar a estrutura do solo, aumentar os teores de matéria orgânica e favorecer a manutenção ou incremento dos estoques de carbono (EstC). A aplicação de vinhaça, por exemplo, pode atingir volumes de 100 a 300 m³ ha⁻¹, enquanto o uso contínuo desses resíduos pode promover incrementos de até 0,5 a 1,5 Mg ha⁻¹ nos estoques de carbono do solo, além de favorecer a ciclagem de nutrientes essenciais (Cantarella *et al.*, 2018).

Entretanto, o manejo conservacionista da cana-de-açúcar vai além da simples manutenção da palhada. Ele envolve a integração de práticas que atuam conjuntamente na melhoria da qualidade do solo. Em experimento de longa duração conduzido no Brasil, verificou-se que sistemas com baixa ou nenhuma remoção de palhada favorecem o acúmulo de carbono no solo, enquanto a remoção intensiva resulta em perdas desses estoques ao longo do

perfil. Além disso, incrementos de até 1,64 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no carbono do solo podem ser observados em sistemas com manutenção dos resíduos vegetais, evidenciando o papel da palhada na conservação da matéria orgânica e da estrutura do solo (Pimentel *et al.*, 2024).

Ademais, a interação entre manejo de resíduos e sistemas de preparo do solo também influencia diretamente os estoques de carbono. Diante desse contexto, objetivou-se compreender a dinâmica do carbono orgânico e sua relação com os atributos físicos e químicos do solo em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar no Cerrado mineiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

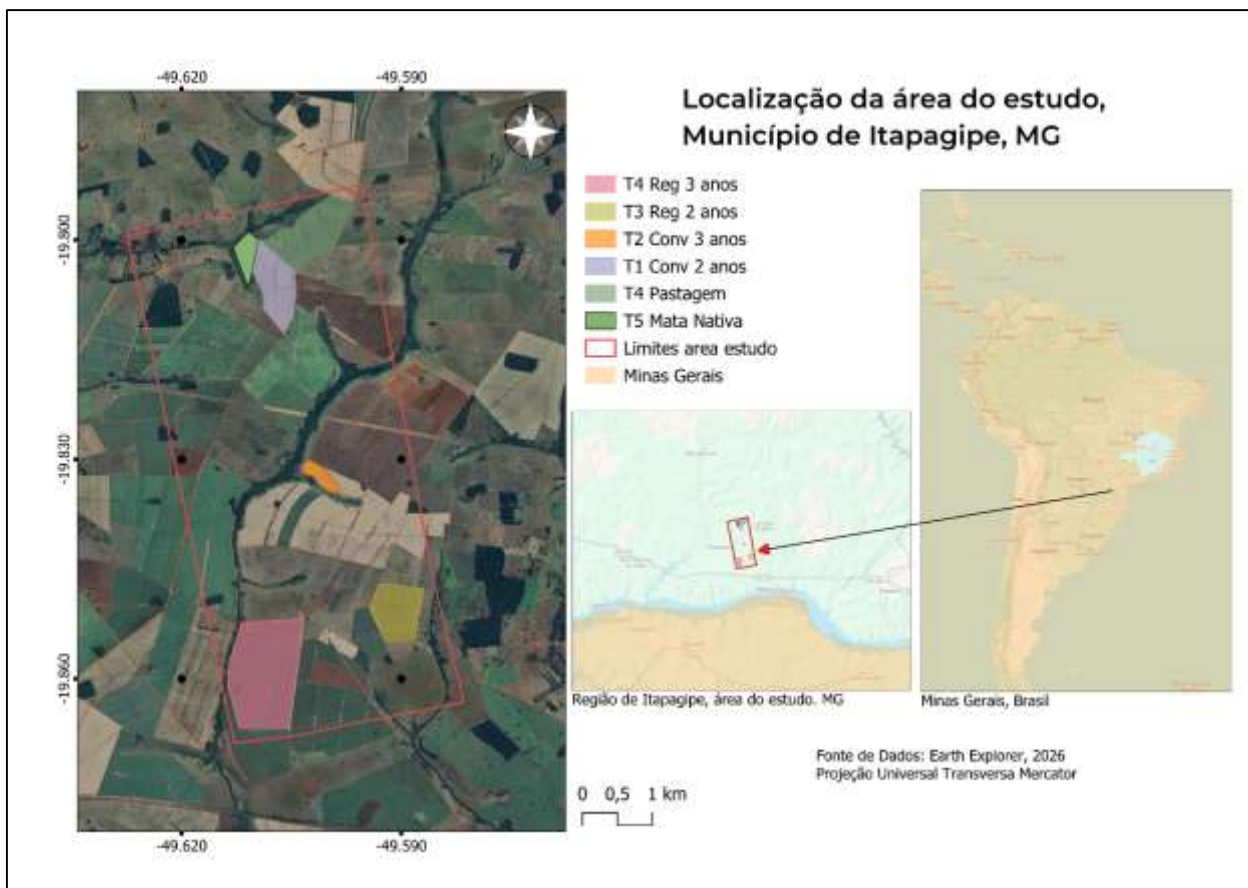
2.1 Local do estudo e coleta de amostras

A área de estudo corresponde à zona rural do município de Itapagipe, situado na microrregião de Frutal, no Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais. O município está localizado às margens do Rio Grande e apresenta relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, com altitude média em torno de 420 m (IBGE, 2025).

O clima da região é classificado como tropical quente, tipo *Aw* na classificação de Köppen-Geiger, caracterizado por duas estações bem definidas: verão chuvoso, de novembro a abril, e inverno seco, de maio a outubro. A temperatura média anual é de aproximadamente 23,8 °C, com médias mensais superiores a 25 °C durante os meses mais quentes, de novembro a março (IBGE, 2008). A precipitação média anual do município é de 1.430 mm.

Os solos predominantes da zona rural de Itapagipe são classificados como Latossolo Vermelho, textura franco arenosa, que na camada até 0,40 m possuem a granulometria de 190, 690 e 120 g kg⁻¹ de argila, areia e silte respectivamente, característicos da região do Triângulo Mineiro por serem profundos, bem drenados e altamente intemperizados. A qualidade do solo foi avaliada em diferentes sistemas de cultivo de cana-de-açúcar, considerados no presente estudo como tratamentos.

Figura 1 - Mapa da área das glebas onde foram realizadas as coletas dos solos, no município de Itapagipe-MG.



Fonte: Google Earth Pro.

As áreas com dois e três anos de cultivo de cana correspondem às glebas anteriormente ocupadas por pastagens que foram convertidas para a produção canavieira. Os sistemas escolhidos como tratamentos foram:

- **Conv.2:** Cana-de-açúcar com 2 anos sob manejo convencional. Caracterizado pelo preparo mecanizado do solo, utilização predominante de adubação mineral e manejo fitossanitário baseado na aplicação de defensivos agrícolas registrados para a cultura. A adubação foi realizada por meio da aplicação de fertilizantes minerais contendo nitrogênio, fósforo e potássio, nutrientes considerados essenciais para o crescimento e produtividade da cana-de-açúcar, sendo utilizados fertilizantes nitrogenados e fosfatados, além de cloreto de potássio (KCl) como principal fonte de potássio devido ao seu elevado teor de K_2O e elevada solubilidade. Essas aplicações foram realizadas no sulco de plantio, conforme os tratos culturais adotados na área.

O preparo do solo foi realizado por meio de operações mecanizadas características do sistema convencional, incluindo subsolagem, aração, gradagem e sulcação, com o objetivo de

promover a descompactação do solo, incorporação de corretivos e fertilizantes e formação adequada do sulco de plantio para o estabelecimento da cultura. Durante o ciclo da cultura foram realizados o manejo de plantas daninhas, pragas e doenças por meio da aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas conforme monitoramento da área e recomendações técnicas agronômicas;

- **Conv.3:** Cana-de-açúcar com 3 anos sob manejo convencional - semelhante ao Conv.2, utilizando insumos químicos e práticas agrícolas tradicionais de alto aporte externo;

- **Cult. Min. 2:** Cana-de-açúcar com 2 anos sob manejo de cultivo mínimo, conduzida com enfoque em práticas conservacionistas, apresentando aproximadamente dois anos de adoção dessas práticas no momento das avaliações. Esse sistema caracteriza-se pela priorização de processos biológicos do solo, reciclagem de nutrientes e redução significativa da dependência de fertilizantes minerais e defensivos químicos sintéticos, diferenciando-se do manejo convencional

O sistema de manejo cultivo mínimo foi caracterizado pela adoção de práticas de menor perturbação do solo durante a implantação do canavial, priorizando a conservação da estrutura física e a manutenção dos processos biológicos do solo. Após o cultivo da crotalária como planta de cobertura e sua posterior dessecação, o plantio da cana-de-açúcar foi realizado em sistema de mínimo revolvimento, no qual foram eliminadas as operações convencionais de preparo intensivo, como aração, gradagem e subsolagem em área total. Nesse sistema, a mobilização do solo ficou restrita à abertura da linha de plantio, realizada apenas na faixa destinada ao estabelecimento das mudas, mantendo-se a maior parte da superfície do solo coberta pelos resíduos vegetais provenientes da cultura antecessora.

O mínimo revolvimento caracteriza-se pela redução da intensidade e da extensão do preparo do solo, promovendo menor alteração da agregação, menor exposição da matéria orgânica à decomposição e menor perturbação dos organismos edáficos quando comparado ao preparo convencional. Dessa forma, a implantação da cultura ocorre com menor inversão e fragmentação das camadas superficiais, preservando a continuidade dos poros e a proteção física da matéria orgânica associada aos agregados do solo.

Durante o estabelecimento do canavial, a crotalária previamente cultivada foi mantida como cobertura vegetal até a dessecação, contribuindo para a proteção superficial do solo, aporte de biomassa e ciclagem de nutrientes. Após a dessecação, a palhada permaneceu sobre a superfície, sendo realizado o plantio da cana diretamente na área, com abertura localizada do sulco e deposição das mudas, evitando o revolvimento generalizado do perfil do solo.

No manejo fitossanitário foram priorizados bioinsumos e agentes de controle biológico para o manejo de pragas de solo e da parte aérea da cultura. Foram utilizados microrganismos entomopatogênicos e promotores de crescimento vegetal, incluindo bactérias do gênero *Bacillus* spp. e fungos entomopatogênicos como *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*, organismos amplamente empregados em programas de manejo integrado de pragas devido à capacidade de reduzir populações de insetos por meio de mecanismos de infecção, antagonismo e competição. Além disso, o sistema foi associado ao uso predominante de fontes orgânicas de fertilização e bioinsumos, buscando estimular a atividade microbiológica, favorecer a ciclagem de nutrientes e promover melhorias nos atributos relacionados à qualidade do solo. No manejo nutricional da cultura, a principal fonte de potássio utilizada foi a vinhaça, subproduto líquido gerado durante o processo de destilação do etanol nas usinas sucroenergéticas, com o objetivo de suprir parte da demanda nutricional da cultura por potássio.

Complementarmente, foi utilizada torta de filtro enriquecida como fonte de matéria orgânica e nutrientes. A torta de filtro é um resíduo sólido proveniente do processo de clarificação do caldo de cana nas usinas e apresenta elevados teores de matéria orgânica, fósforo, cálcio e micronutrientes, contribuindo para a melhoria das propriedades químicas e físicas do solo. Para aumentar a disponibilidade de fósforo no sistema, a torta de filtro foi enriquecida com fontes fosfatadas comumente utilizadas na cultura da cana-de-açúcar, como superfosfato triplo e fosfatos naturais reativos. A adubação nitrogenada mineral foi substancialmente reduzida, priorizando-se estratégias biológicas para o fornecimento de nitrogênio à cultura. Entre essas estratégias destacou-se a inoculação com bactérias promotoras de crescimento vegetal do gênero *Azospirillum*, microrganismos capazes de promover a fixação biológica de nitrogênio atmosférico e estimular o desenvolvimento radicular das plantas, contribuindo para maior eficiência na absorção de nutrientes.

Antes do estabelecimento da cultura da cana-de-açúcar, foi realizada rotação com cultura de cobertura do gênero *Crotalaria* spp, utilizada como adubação verde. Após o desenvolvimento da cobertura vegetal, procedeu-se à dessecação da biomassa e a implantação da cana-de-açúcar em sistema de cultivo mínimo sem preparo convencional do solo. No manejo fitossanitário, priorizou-se o uso de insumos biológicos para o controle de pragas e doenças, reduzindo a utilização de defensivos químicos convencionais. Essa estratégia baseia-se no emprego de microrganismos e agentes de controle biológico, visando promover maior equilíbrio ecológico no sistema produtivo e contribuir para a sustentabilidade do agroecossistema;

- **Cult. Min. 3:** Cana-de-açúcar com 3 anos sob manejo de cultivo mínimo, semelhante ao Cult. Min. 2, reforçando estratégias de manejo sustentável, com ênfase em recuperação e manutenção da qualidade do solo;

- **Past.:** Pastagem cultivada com *Brachiaria spp.*, área destinada à pecuária, utilizada como referência de uso agropecuário extensivo, com menor intensidade de insumos agrícolas;

- **M.N:** Mata nativa de Cerrado, área de vegetação natural preservada, representativa da cobertura vegetal original da região de Itapagipe, MG, caracterizada predominantemente por fitofisionomia de Cerrado sentido restrito, com presença de espécies arbóreas e arbustivas adaptadas às condições edafoclimáticas locais. A área não apresenta histórico recente de uso agrícola ou intervenções antrópicas relacionadas ao preparo do solo, sendo utilizada como condição de referência para avaliação dos atributos físicos, químicos e dos estoques de carbono em um ambiente com menor grau de alteração antrópica.

A inclusão dessa área de referência permitiu estabelecer um gradiente de uso e manejo do solo, contemplando desde uma condição natural preservada até sistemas agrícolas com diferentes níveis de intervenção, possibilitando a avaliação comparativa dos efeitos do cultivo da cana-de-açúcar sob manejo convencional e regenerativo sobre a qualidade estrutural do solo, a dinâmica da matéria orgânica e os estoques de carbono.

2.2 Determinação dos pontos de coleta e delineamento experimental

As delimitações das áreas foram feitas por meio de processamento de imagens de satélite utilizando a ferramenta Qgis e Google Earth Pro. Após a delimitação, as áreas foram subdivididas em cinco sub-áreas dentro de cada tratamento, consideradas como repetições.

Assim o estudo foi feito em delineamento inteiramente casualizado com 6 tratamentos, 5 repetições e 3 profundidades, em esquema fatorial 6 (sistemas de cultivo) x 3 (profundidades).

Com base na homogeneidade das características do solo e relevo foram abertas trincheiras de 0-40 m de profundidade por aproximadamente 0,50 m de largura para a retirada das amostras de solo. As profundidades da coleta foram: 0-10 cm; 10-20 cm; 20-40 cm, totalizando 90 amostras de solo.

2.3 Densidade aparente e porosidade do solo

A densidade aparente do solo (D_s) foi determinada a partir de amostras indeformadas coletadas nas profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm por meio do método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011).

Figura 2 - Anel volumétrico de aço sendo cravado a 10 cm m de profundidade para coleta de amostra de solo indeformada, com o trado de Uhland em Itapagipe, MG, 2025.



Fonte: do autor, 2025

A distribuição do sistema poroso do solo, um indicador crucial da sua qualidade física, foi determinada seguindo a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Este procedimento, conhecido como método do cilindro e da mesa de tensão, permite a quantificação precisa das diferentes classes de poros a partir de amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros volumétricos.

Inicialmente, as amostras de solo foram saturadas por capilaridade até que todos os seus poros estivessem preenchidos com água. Em seguida, para a determinação da macroporosidade, as amostras saturadas foram submetidas a uma sucção de 6 kPa em uma mesa de tensão. Essa tensão é calibrada para drenar a água contida nos poros de maior diâmetro, que são responsáveis pela aeração e pela drenagem gravitacional do solo. O volume de macroporos foi, então, calculado pela diferença entre a massa da amostra saturada e sua massa após o equilíbrio na mesa de tensão, dividida pelo volume total do cilindro.

Sequencialmente, a microporosidade foi quantificada. Este volume corresponde aos poros menores, que retêm água contra a força da gravidade e a tornam disponível para as plantas. Para medi-la, a massa de água retida na amostra após a aplicação da tensão de 6 kPa

foi determinada. Isso foi feito calculando-se a diferença entre a massa da amostra retirada da mesa de tensão e sua massa seca, obtida após a secagem em estufa a 105 °C por 24 horas. Esse valor, dividido pelo volume do cilindro, representa o volume de microporos.

Figura 3 - Anéis volumétricos sendo saturados por 24 horas, para depois serem colocados em mesa de tensão a 0,6 m de altura de coluna de água, no Laboratório de Física do Solo da UFU Campus Uberlândia, MG.



Fonte: do autor, 2025.

Finalmente, a porosidade total do solo foi estabelecida pelo somatório dos volumes de macroporos e microporos, fornecendo uma medida completa do espaço poroso total da amostra, conforme o protocolo padrão da Embrapa.

$$Ds = \frac{Ms}{V}$$

$$PT = Ma + Mi$$

$$Ma = \frac{MSsat - MSu}{V}$$

$$Mi = \frac{MSu - MSS}{V}$$

Em que:

Ds = densidade aparente do solo (g cm⁻³);

Ms = massa do solo seco a 105 °C (g);

V = volume do anel volumétrico (cm³);

PT = porosidade total (cm³ cm⁻³ ou %);

Ma = macroporosidade (cm³ cm⁻³);

Mi = microporosidade (cm³ cm⁻³);

MSsat = massa do solo saturado (g);

MSu = massa do solo úmido após mesa de tensão (g);

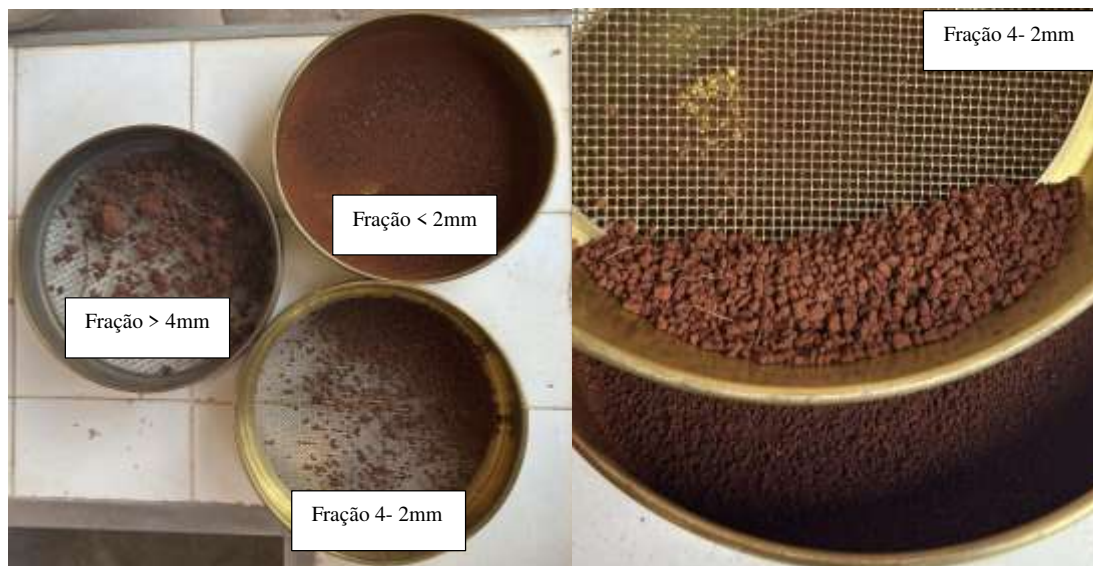
MSs = massa do solo seco (g)

2.4 Estabilidade de Agregados

A separação e posterior análise de estabilidade de agregados foi feita por tamisação úmida para as três respectivas profundidades, 0-10; 10-20; 20-40 cm segundo método descrito em EMBRAPA (2018). O peneiramento a seco foi realizado passando a amostra por duas peneiras, uma de 4,00 mm e outra de 2,00 mm, com fundo coletor. A fração de terra retida na peneira de 2,00 mm foi utilizada para a avaliação da estabilidade de agregados (Figura 4).

Após a obtenção dessa amostra foram pesados 25 g de solo em duplicata que foram colocados em dois conjuntos, cada um com quatro peneiras com aberturas de 2,00 mm, 1,00 mm, 0,50 mm e 0,25 mm, sendo então agitadas em agitador de Yoder por 4 minutos, seguidos de 4 minutos em repouso. Em seguida, cada classe de agregados foi colocada em estufa a 105 °C por 24 horas e, logo após, cada amostra foi pesada separadamente em cada classe de agregados.

Figura 4 - Diferentes classes de agregados obtidas.



Fonte: do autor, 2025.

O diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG), que avaliam o tamanho médio dos agregados do solo, refletindo a qualidade da estrutura do solo e sua resistência à desagregação, foi calculado com base na massa dos agregados retidos em cada

peneira durante o teste de estabilidade de agregados, segundo equação (Kemper & Rosenau, 1986):

$$DMP = \sum (x_i * w_i), = 1 \text{ até } n$$

w_i = Proporção de cada classe de agregados em relação ao total.

x_i = Diâmetro médio de cada classe de agregados.

O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados (Kemper & Rosenau, 1986): $DMG = \exp[\sum (w_i * \log(x_i) / \sum w_i)]$, $i = 1 \text{ até } n$

w_i = Peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio x_i .

2.5 Índice de Estabilidade de Agregados

O cálculo do IEA é tradicionalmente realizado pelo método de peneiramento em água, e foi realizado nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-40 cm conforme a metodologia proposta por Yoder (1936) e adaptada por diversos pesquisadores no Brasil, como Kemper & Rosenau (descrito em Embrapa, 2017). O método consiste em submeter uma massa de agregados a uma oscilação controlada em água, quantificando-se a proporção de agregados que permanece estável após o ensaio.

Fórmula:

- IEA = (MASSA INICIAL – MASSA RESÍDUO) / MASSA INICIAL * 100
- Massa inicial de solo: peso seco total da amostra antes do teste.
- Massa resíduo: peso das partículas que se desagregaram após imersão ou agitação.
- Resultado: dado em porcentagem.

Valores maiores indicam agregados mais resistentes e solos estruturalmente mais saudáveis. Tormenta et al. (2008): classificaram IEA superior a 80% como indicador de boa qualidade estrutural em Latossolos do Cerrado.

2.6 Determinação do Carbono Orgânico Total (COT)

A determinação do carbono orgânico nas amostras de solo foi realizada por digestão via úmida e titulação, para as três profundidades, 0-10; 10-20; 20-40 cm conforme método baseado em Walkley-Black, descrito pela Embrapa (2018).

2.7 Determinação do Estoque de Carbono

A quantificação do estoque de carbono orgânico no solo é realizada por meio de uma abordagem que integra o teor de carbono orgânico, a densidade do solo e a profundidade da camada amostrada. Foram utilizadas as profundidades coletadas em 0-10;10-20 cm. Essa metodologia é amplamente reconhecida por instituições como o IPCC (2006) e recomendada por Lal (2004) em estudos de sequestro de carbono, sendo também adotada pela Embrapa em protocolos de avaliação da qualidade do solo.

O cálculo é feito com base na seguinte equação:

$$\text{EstC} = \text{EstC} = (\text{CO} \times \text{Ds} \times e) \div 10$$

Onde:

- a) EstC = Estoque de carbono orgânico no solo (Mg ha^{-1})
- b) CO = Teor de carbono orgânico (dag kg^{-1})
- c) Ds = Densidade do solo (kg dm^{-3})
- d) e = Espessura da camada amostrada (cm)
- e) 10 = Fator de conversão para megagramas por hectare

Essa equação permite expressar o estoque de carbono em megagramas por hectare (Mg ha^{-1}), unidade padrão para estudos de balanço de carbono em sistemas agrícolas e naturais.

2.8 Análise Estatística

A análise estatística adotada para avaliar os resultados foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial considerando seis tratamentos (uso do solo), 3 profundidades com cinco repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para análise de dados foi utilizado o programa Rstudio.

As médias dos sistemas de manejo foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. A análise foi realizada considerando todos os tratamentos avaliados, permitindo identificar diferenças estatísticas entre os sistemas de uso e manejo do solo. A mata nativa foi considerada uma condição de referência ambiental para interpretação dos resultados, representando um sistema com menor influência antrópica e maior conservação das características originais do solo. Além disso, a avaliação das diferentes profundidades permitiu verificar a distribuição dos efeitos dos manejos sobre os atributos físicos do solo ao longo do perfil, considerando que as alterações estruturais podem ocorrer tanto nas camadas superficiais quanto subsuperficiais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade Aparente do solo

A densidade do solo apresentou efeito significativo para o fator manejo ($p < 0,001$), evidenciando que os diferentes sistemas de uso e manejo promoveram modificações no estado de compactação do solo (Tabela 1). Por outro lado, a profundidade não apresentou efeito significativo ($p = 0,9289$), assim como a interação manejo $\times$ profundidade ($p = 0,4857$), indicando que a variação da densidade está associada aos diferentes sistemas manejo, que promoveram modificações na compactação do solo.

Tabela 1 - Valores de Densidade Aparente do Solo, sob diferentes sistemas de manejo, em área experimental do Cerrado Mineiro.

Tratamento	Densidade Aparente do Solo (g cm^{-3})		
	Profundidade (cm)		Média
	0-10	10-20	
Conv. 2	1,38	1,43	1,41ab
Conv. 3	1,61	1,43	1,52a
Cult. Min. 2	1,48	1,52	1,50a
Cult. Min. 3	1,31	1,36	1,34bc
Pastagem	1,51	1,53	1,52a
Mata Nativa	1,20	1,22	1,22c
Médias	1,42	1,42	
CV (%)	6,75		

CV- Coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

O teste de comparação de médias de Tukey demonstrou diferenças entre os sistemas avaliados. Os maiores valores médios de densidade foram observados nos manejos de pastagem ($1,52 \text{ g cm}^{-3}$) e convencional de 3 anos ($1,52 \text{ g cm}^{-3}$), seguidos pelo sistema cultivo mínimo de 2 anos ($1,49 \text{ g cm}^{-3}$). Em contrapartida, a mata nativa apresentou o menor valor médio de densidade ($1,22 \text{ g cm}^{-3}$), enquanto os sistemas convencionais de 2 anos e regenerativo de 3 anos apresentaram comportamento intermediário.

A elevação da densidade nos sistemas agrícolas está relacionada às alterações promovidas pelo uso do solo, especialmente pelo tráfego de máquinas, pisoteio animal e redução do aporte contínuo de resíduos orgânicos. Esses processos favorecem o rearranjo das partículas, a redução do volume de macroporos e o aumento da resistência mecânica do solo, podendo limitar a infiltração de água, a circulação de gases e o crescimento radicular.

A menor densidade observada no sistema cultivo mínimo de 3 anos demonstra uma tendência de recuperação estrutural, aproximando-se da condição encontrada na mata nativa. Esse comportamento pode estar associado ao menor tráfego de maquinários, ao maior aporte de carbono orgânico, maior atividade biológica e formação de agregados mais estáveis, características frequentemente associadas a sistemas de manejo conservacionistas, principalmente aos sistemas de manejo adotados, independentemente da profundidade avaliada.

3.2 Macro porosidade (Ma), Micro porosidade (Mi), Porosidade Total (PT) do solo

A macroporosidade foi significativamente influenciada pelo fator manejo ($p < 0,001$), enquanto a profundidade e a interação manejo $\times$ profundidade não apresentaram efeito significativo. O cultivo mínimo de 3 anos apresentou o maior valor médio de macroporosidade (24,16%), diferenciando-se dos demais sistemas avaliados. Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa, incluindo a mata nativa (15,66%), indicando comportamento semelhante quanto à formação de poros de maior diâmetro (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de Macro porosidade (Ma), Micro porosidade (Mi), Porosidade Total (PT) na camada de 0–10;10-20 cm sob diferentes sistemas de manejo, em área experimental do Cerrado Mineiro.

Tratamento	Ma	Mi	PT	Ma/PT
			(%)	
Conv. 2	13,20b	31,25ab	44,46a	0,30b
Conv. 3	12,16b	26,62bc	38,78b	0,31b
Cult. Min. 2	12,28b	26,15bc	38,43b	0,32b
Cult. Min. 3	24,17a	23,76c	47,93a	0,50a
Pastagem	9,98b	28,71abc	38,70b	0,25b
Mata Nativa	15,67b	33,12a	48,78a	0,32b
CV (%)	31,55	13,69	7,76	27,82

CV- Coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A maior macroporosidade observada no sistema cultivo mínimo de 3 anos evidencia um efeito positivo desse manejo sobre a estrutura física do solo, favorecendo a formação de poros responsáveis pela drenagem e pela aeração do solo. A manutenção de níveis adequados de

macro poros é fundamental para garantir condições favoráveis ao desenvolvimento radicular e ao funcionamento dos processos hidrológicos.

Nos demais sistemas os resultados indicam que os diferentes manejos não promoveram alterações expressivas nesse atributo.

A microporosidade apresentou efeito significativo para o fator manejo ($p < 0,001$) sem efeito significativo da profundidade ou da interação entre os fatores, demonstrando que os sistemas avaliados modificaram a distribuição dos poros de menor diâmetro independentemente da camada analisada. A mata nativa apresentou o maior valor médio de microporosidade (33,12%), seguida pelo manejo convencional de 2 anos (31,25%). Os menores valores foram observados no cultivo mínimo de 3 anos (23,76%), convencional de 3 anos (26,62%) e cultivo mínimo de 2 anos (26,15%).

A redução da microporosidade em alguns sistemas agrícolas pode indicar alterações na distribuição dos poros responsáveis pela retenção de água. Entretanto, a interpretação desse atributo deve ser realizada em conjunto com densidade, macroporosidade e porosidade total, uma vez que modificações na estrutura do solo podem promover redistribuição entre classes de poros, sem necessariamente representar perda de qualidade física isoladamente.

A porosidade total apresentou efeito significativo do fator manejo ($p < 0,001$), enquanto profundidade e interação manejo $\times$ profundidade não foram significativas, indicando que os sistemas de manejo foram responsáveis pelas alterações observadas na quantidade total de espaços porosos do solo (Tabela 2). Os maiores valores de porosidade total ocorreram na área de mata nativa (48,78%) e no cultivo mínimo de 3 anos (47,93%), que permaneceram no mesmo grupo estatístico. Os demais sistemas apresentaram menores valores, variando entre 38,43 e 44,46%. A maior porosidade total observada na mata nativa e no cultivo mínimo de 3 anos evidencia uma condição estrutural mais favorável, associada à menor compactação e maior presença de espaços vazios no solo. Esse resultado corrobora os valores observados para densidade do solo, indicando que sistemas conservacionistas apresentam potencial para preservar ou recuperar atributos relacionados à qualidade física do solo.

De maneira integrada, os resultados demonstram que o manejo foi o principal fator responsável pelas alterações nos atributos físicos do solo, enquanto a profundidade avaliada não apresentou influência significativa sobre as variáveis analisadas. A ausência de interação manejo $\times$ profundidade indica que os efeitos dos sistemas de uso ocorreram de forma consistente ao longo das camadas avaliadas.

A análise conjunta dos atributos evidencia que sistemas agrícolas mais intensivos promoveram aumento da densidade do solo e redução da porosidade total, indicando maior grau de alteração

estrutural. Em contrapartida, o cultivo mínimo de 3 anos apresentou comportamento semelhante ou superior à condição de referência em atributos relacionados à estrutura do solo, como menor densidade, maior macroporosidade e maior porosidade total.

Dessa forma, os resultados indicam que a avaliação da qualidade física do solo deve considerar múltiplos indicadores, uma vez que nenhum atributo isolado é suficiente para caracterizar integralmente os efeitos do manejo sobre a estrutura do solo.

3.3 Diâmetro Médio Geométrico (DMG), Diâmetro Médio Ponderado (DMP)

Os maiores valores foram observados nas áreas de pastagem e mata nativa para DMP e DMG (>1,0 mm e >0,5mm respectivamente em ambos os casos), indicando estabilidade estrutural do solo, associada ao aporte contínuo de matéria orgânica e à ausência de revolvimento (Tabela 3).

Tabela 3 - Diâmetro Médio Geométrico (DMG), Diâmetro Médio Ponderado (DMP), Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) na camada de 0–10;10-20;20-40 cm sob diferentes sistemas de manejo, em área experimental do Cerrado Mineiro.

	DMG	DMP	IEA
	mm		%
Tratamento	Média	Média	Média
Conv. 2	0,36 ab	0,77 ab	50,81abc
Conv. 3	0,31b	0,6b	45,38bc
Cult. Min. 2	0,25 b	0,45 b	42,11 bc
Cult. Min. 3	0,26 b	0,48 b	40,11 c
Pastagem	0,57 a	1,03 a	56,47 ab
Mata Nativa	0,53 a	1,01 a	61,65 a
CV (%)	54,68	47,45	29,62

CV- Coeficiente de variação. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A formação e estabilização de agregados em Latossolos estão fortemente associadas ao manejo e à qualidade da matéria orgânica, sendo processos dependentes do tempo, o que explica a ausência de recuperação estrutural nos sistemas de cultivo mínimo recentes. Souza, Marcelo e Centurion (2012) apresentam resultados em áreas de cana-de-açúcar onde justificam que o seu cultivo possui um tráfego intenso de máquinas e equipamentos agrícolas nas suas operações

de colheita e transporte, além dos tratos culturais durante todo o ciclo da cultura, causando compactação e induzindo ao fracionamento de agregados, principalmente na camada de 0,10m.

Os valores do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) foram distintos entre os sistemas de manejo avaliados (Tabela 3). Os maiores índices foram observados nos tratamentos correspondentes ao Mata nativa (61,65%) e à pastagem (56,47%), os quais diferiram dos sistemas agrícolas de cana-de-açúcar. Esses ambientes mantêm maior cobertura vegetal e diversidade radicular, condições que favorecem a formação e a persistência de agregados estáveis por meio do aporte contínuo de matéria orgânica e da intensa atividade biológica (Six *et al.*, 2000; Salton *et al.*, 2008).

Nos sistemas de cana-de-açúcar convencional (2 anos, 50,81%; 3 anos, 45,38%) e de cultivo mínimo (2 anos, 42,11%; 3 anos, 40,11%) observa-se redução expressiva na estabilidade de agregados, refletindo o efeito cumulativo do preparo intensivo do solo, do tráfego de máquinas e do menor retorno de resíduos orgânicos. Esses fatores contribuem para a ruptura dos agregados e exposição da matéria orgânica à oxidação, reduzindo o potencial de agregação e aumentando a vulnerabilidade do solo à erosão (Souza; Marcelo; Centurion, 2012). A comparação entre os manejos evidencia que a pastagem apresenta comportamento intermediário entre os sistemas agrícolas e a Mata nativa, demonstrando o potencial de sistemas perenes na recuperação gradual da estrutura do solo. Esse resultado está em consonância com estudos que destacam o papel da cobertura permanente e da diversidade de raízes na proteção física da matéria orgânica e na manutenção da estabilidade dos agregados (Salton *et al.*, 2008).

3.4 Carbono Orgânico Total

A análise de variância realizada para o carbono orgânico total (COT) demonstrou efeito significativo do fator manejo ($p < 0,001$), indicando que os diferentes sistemas de uso e manejo do solo promoveram alterações nos teores de carbono orgânico acumulado. Entretanto, o fator profundidade não apresentou efeito significativo ($p = 0,198$), assim como a interação manejo $\times$ profundidade ($p = 0,952$), evidenciando que a resposta do COT aos sistemas de manejo ocorreu de maneira independente da profundidade avaliada. Dessa forma, a interpretação dos resultados foi realizada considerando o efeito isolado dos sistemas de manejo sobre os teores de carbono orgânico do solo (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de Carbono Orgânico Total (COT) nos diferentes usos, em área experimental do Cerrado Mineiro.

Tratamento	COT			
	(g kg ⁻¹)			
	Profundidade (cm)			
	0-10	10-20	20-40	Média
Conv. 2	19,36	18,72	15,31	17,80a
Conv. 3	8,95	7,49	4,30	6,92b
Cult. Min. 2	18,72	18,51	18,08	18,44a
Cult. Min. 3	19,14	17,02	12,12	16,10a
Pastagem	13,74	7,45	9,27	10,16ab
Mata Nativa	6,07	11,08	5,68	7,61b
CV (%)	60,62			

CV – Coeficiente de variação; COT – carbono orgânico total. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os maiores teores de COT foram observados no sistema de cultivo mínimo de 2 anos (18,44 g kg⁻¹), convencional de 2 anos (17,80 g kg⁻¹) e sistema de cultivo mínimo de 3 anos (16,10 g kg⁻¹). Em contrapartida, a mata nativa apresentou teor médio de 7,61 g kg⁻¹, juntamente com o manejo convencional de 3 anos (6,91 g kg⁻¹), ambos com menores valores. A área de pastagem apresentou comportamento intermediário, com valor médio de 10,16 g kg⁻¹, não diferindo estatisticamente dos grupos superior e inferior.

O maior acúmulo de carbono observado no cultivo mínimo demonstra o potencial desses manejos em favorecer a incorporação e manutenção de matéria orgânica no solo. O aumento do COT está relacionado principalmente ao maior aporte de resíduos vegetais, manutenção da cobertura do solo e estímulo aos processos biológicos responsáveis pela ciclagem de nutrientes e estabilização da matéria orgânica.

O comportamento observado no cultivo mínimo de 3 anos é particularmente relevante, uma vez que apresentou valores elevados de COT, próximos aos sistemas com maior tempo de adoção do manejo. Esse resultado sugere que práticas conservacionistas podem promover incrementos no estoque de carbono mesmo em períodos relativamente curtos de implantação, contribuindo para a recuperação da qualidade química e biológica do solo.

Por outro lado, o menor teor de carbono observado no sistema convencional de 3 anos indica possível redução do aporte orgânico e maior intensidade de processos de mineralização da matéria orgânica. Sistemas agrícolas submetidos a maior revolvimento do solo tendem a favorecer a exposição da matéria orgânica aos agentes decompositores, aumentando as perdas de carbono na forma de CO₂ e reduzindo sua estabilização nos agregados do solo.

Embora os valores médios tenham apresentado tendência de redução do carbono orgânico com o aumento da profundidade, variando de 1,43% na camada de 0-10 cm para 1,08% na camada de 20-40 cm, essas diferenças não foram estatisticamente significativas.

A ausência de efeito significativo da profundidade indica que, nas condições avaliadas, a distribuição vertical do carbono orgânico apresentou comportamento semelhante entre as camadas analisadas. Esse resultado pode estar relacionado à homogeneidade das condições edáficas da área experimental e ao histórico de manejo dos sistemas avaliados.

Entretanto, a tendência de maiores valores na camada superficial está de acordo com o comportamento esperado para solos sob diferentes sistemas de manejo, uma vez que a superfície concentra maior deposição de resíduos vegetais, atividade microbiana e ciclagem de nutrientes. A manutenção de resíduos na superfície e a menor mobilização do solo são fatores determinantes para o incremento gradual dos estoques de carbono nas camadas superiores.

O coeficiente de variação observado para o COT foi de 60,62%, indicando elevada variabilidade dos dados. Entretanto, esse comportamento deve ser interpretado considerando a natureza dos dados obtidos em condições de campo, onde a distribuição do carbono orgânico apresenta elevada heterogeneidade espacial devido às diferenças no histórico de uso do solo, deposição irregular de resíduos vegetais, variações na atividade biológica e distribuição não uniforme da matéria orgânica.

Valores elevados de coeficiente de variação são frequentemente observados para atributos relacionados à matéria orgânica do solo, principalmente em áreas submetidas a diferentes sistemas de manejo, nas quais pequenas variações espaciais podem resultar em grandes diferenças nos teores determinados. Embora transformações estatísticas possam reduzir a dispersão dos dados, a manutenção dos valores originais permite representar a variabilidade real existente entre os sistemas avaliados.

Além disso, apesar da elevada variabilidade experimental, os pressupostos estatísticos foram atendidos, uma vez que o teste de normalidade de Shapiro-Wilk indicou distribuição normal dos resíduos ($p = 0,2829$), permitindo a utilização da análise de variância e do teste de comparação de médias.

3.5 Estoque de Carbono

Não houve interação significativa entre os fatores profundidade e sistema de manejo, porém, os resultados mostraram diferenças significativas entre os sistemas de manejo avaliados (Tabela 5). O maior estoque de carbono foi encontrado no sistema cultivo mínimo com três anos (43,40 Mg ha⁻¹), evidenciando o efeito positivo da adoção de práticas conservacionistas.

Tabela 5 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) na camada de 0-10;10-20 cm sob diferentes sistemas de manejo, em área experimental no município de Itapagipe, MG.

EstC			
(Mg ha ⁻¹)			
Tratamento	Profundidade		
	0-10	10-20	Média
		(cm)	
Conv. 2	21,20	49,25	35,22ab
Conv. 3	26,18	34,43	30,31ab
Cult. Min. 2	1,97	32,33	17,15b
Cult. Min. 3	24,77	62,02	43,40a
Pastagem	17,55	55,76	36,65ab
Mata Nativa	16,92	43	29,96 ab
CV (%)		53,67	

CV- Coeficiente de variação; EstC – estoque de carbono. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A mata nativa apresentou valor de $29,96 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo considerada referência natural. Esses resultados estão em concordância com estudos de síntese e revisões para o bioma Cerrado, que indicam redução do estoque de carbono após conversão para uso agrícola, mas recuperação quando práticas conservacionistas são adotadas. Por exemplo, Carvalho *et al.*, 2023 relatam que a manutenção de palhada e sistemas conservacionistas favorecem o acúmulo de C no solo, enquanto relatórios regionais da Embrapa e estudos locais mostram estoques médios em áreas de cana entre $\sim 21\text{-}35 \text{ Mg ha}^{-1}$ (camadas superficiais), e estoques de pastagens frequentemente em valores intermediários - padrão semelhante ao observado neste estudo.

A pastagem se destacou com valores intermediários ($36,65 \text{ Mg ha}^{-1}$), atribuídos ao aporte contínuo de biomassa radicular. Já os sistemas convencionais apresentaram os menores estoques, associados à maior compactação e à intensificação da mineralização da matéria orgânica. Os resultados confirmam que o tempo de adoção do manejo cultivo mínimo influencia diretamente a recuperação do estoque de carbono, aproximando e até superando os valores da condição natural em curto prazo.

O estoque de carbono em Latossolos do Cerrado demonstrou ser altamente sensível às práticas de manejo adotadas. Os resultados obtidos indicam que os sistemas de cana-de-açúcar sob manejo convencional tendem a reduzir o estoque de carbono, devido ao impacto negativo sobre a estrutura física e à aceleração da decomposição da matéria orgânica.

Em contraste, os sistemas cultivo mínimo, especialmente após três anos de implantação, apresentaram maior acúmulo de carbono no solo, aproximando-se dos valores observados na mata nativa. A pastagem, por sua vez, mostrou potencial relevante na manutenção e incremento

dos estoques de carbono, reforçando a contribuição do sistema radicular das gramíneas e do aporte contínuo de resíduos orgânicos.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que o manejo do solo exerce influência direta sobre atributos físicos e teores de carbono no solo.

Os diferentes sistemas de manejo apresentaram contrastes significativos no estoque de carbono do solo, na estabilidade de agregados e da densidade do solo, evidenciando o papel do manejo na manutenção da estrutura e conservação dos solos.

O sistema de cultivo mínimo com três anos de implantação (Cult. Mín. 3) apresentou menor densidade, além de atingir o maior estoque de carbono observado.

Embora a estabilidade de agregados nos sistemas agrícolas ainda não tenha alcançado os níveis da mata nativa e da pastagem, evidenciando a sensibilidade desse atributo ao revolvimento e ao tráfego de máquinas, observa-se uma trajetória clara de recuperação estrutural nos sistemas conservacionistas.

Conclui-se que a transição para o cultivo mínimo favorece a sustentabilidade do agro ecossistema. É fundamental a continuidade de pesquisas de longa duração sob este modelo, visto que o fator tempo é determinante para a estabilização da matéria orgânica e para a plena restauração das funções ecossistêmicas do solo.

REFERÊNCIAS

- ASSAD, E. D. *et al.* Mudanças climáticas e agricultura: impactos, adaptação e mitigação no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 7–20, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/jJP56TJd4ZCKvQ4YmPhXgCk/?lang=pt>. Acesso em: 20 mar.2026.
- CASTIONI, Guilherme Adalberto *et al.* Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil & Tillage Research**, v. 184, p. 301-309, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198718305269>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCHI. *et al.* Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. **Soil and Tillage Research**, v. 212, 105066, 2021. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198721001367>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105066>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2023/24. Brasília: **Conab**, 2023. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 11, n. 4 abril 2024 Disponível em: https://www.novacana.com/pdf/18042024090400_boletim-conab-180424_NC.pdf. Acesso em: 21 abr. 2026.
- CORAZZA, E. J. *et al.* Carbon stocks in Brazilian cerrado soils under different land use. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 144–150, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/tYdQbgRd7mLMQnqByKJDY8M/?lang=en>. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p528-533>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- GAZOLLA P, RONI F. GUARESCHI, ADRIANO PERIN. Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo Vermelho em diferentes sistemas de manejo,2022. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v8i2a2545>. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2545>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- LAL, R. **Soil carbon sequestration to mitigate climate change**. Geoderma, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706104000266>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>. Acesso em: 3 abr. 2026.
- PIMENTEL, M. L. *et al.* Quantity, quality and physical protection of soil carbon associated with sugarcane straw removal in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, 2024. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198723003434>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105976>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- NASCIMENTO, Joel Guerreiro *et al.* Impactos no uso e manejo do solo sobre as propriedades hidráulicas no sul do Amazonas, Brasil. **Cadernos de InterPesquisas**, [s. l.], v. 4, p. e261, 2026. DOI: 10.23900/ci.v4.261. Disponível em: <https://esabere.com/index.php/cadips/article/view/261>. Acesso em: 15 jun. 2026.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805–1816, set. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/5WjW8tsqwwWS6xRyMftbvJM/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

SOUZA, H. A. de.; MARCELO, A. V.; CENTURION, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 658–663, out. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400006>. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rca/a/BKwz6MwwQzLjDGxSf5Gnwwt/>. Acesso em: 25 mar. 2026.

J SIX, H BOSSUYT, S DEGRYZE, K DENEFF. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704000881>. Acesso em: 30 mar. 2026.

MAPBIOMAS. Coleção 10 da Série Anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil (1985-2024): relatório anual de desmatamento e transformação do bioma cerrado. **MapBiomass Brasil**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 11 mar. 2026

CARVALHO *et.al.* Composição química de culturas de cobertura e estoques de matéria orgânica do solo em sistemas de plantio direto no Cerrado. **Uso e Manejo do Solo**, 38, 940–952, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12746>. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/sum.12746>. Acesso em: 30 mar. 2026.