

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

LUIZ GUSTAVO PEREIRA SILVA

**EFEITO TEMPORAL DO CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) SOBRE O
ESTOQUE DE CARBONO E ATIVIDADE BIOLÓGICA NO SOLO**

Uberlândia, MG

2026

LUIZ GUSTAVO PEREIRA SILVA

**EFEITO TEMPORAL DO CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) SOBRE O
ESTOQUE DE CARBONO E ATIVIDADE BIOLÓGICA NO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de
Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia como
requisito parcial para a obtenção
do grau de Engenheiro
Agrônomo.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Araújo
Hulmann Batista

Uberlândia, MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 Silva, Luiz Gustavo Pereira, 2003-
2026 EFEITO TEMPORAL DO CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.)
SOBRE O ESTOQUE DE CARBONO E ATIVIDADE BIOLÓGICA NO
SOLO [recurso eletrônico] / Luiz Gustavo Pereira Silva. - 2026.

Orientador: Araújo Hulmann Batista.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Batista, Araújo Hulmann, 1977-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Agronomia. III.
Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

LUIZ GUSTAVO PEREIRA SILVA

**EFEITO TEMPORAL DO CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) SOBRE O
ESTOQUE DE CARBONO E ATIVIDADE BIOLÓGICA NO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de
Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia como
requisito parcial para a obtenção
do grau de Engenheiro
Agrônomo.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Araújo
Hulmann Batista

Uberlândia, 23 de março de 2026.

LUIZ GUSTAVO PEREIRA SILVA

**EFEITO TEMPORAL DO CULTIVO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) SOBRE O
ESTOQUE DE CARBONO E ATIVIDADE BIOLÓGICA NO SOLO**

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Araújo Hulmann Batista
Orientadora

Prof. Dr. Edson Aparecido dos Santos
Membro da Banca

Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado
Membro da banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pela oportunidade, pelo amor incondicional e por serem exemplo de honestidade, humildade, força e empatia. Toda a minha trajetória foi realizada na tentativa de honrá-los e demonstro aqui minha gratidão por todo o sacrifício. Faço um agradecimento especial aos meus pais, que me concederam a oportunidade sagrada de estudar e por serem responsáveis pela minha formação como ser humano. Agradeço à minha namorada pelo amor e palavras de incentivo, que foram fundamentais para superar os momentos mais desafiadores.

Agradeço aos membros do Núcleo de Estudos em Gênese do Solo – NEGenS por terem participado efetivamente de várias etapas do trabalho, de forma leve e inspiradora.

À minha admirável orientadora, Prof.^a Dr.^a Araújo Hulmann Batista, expresso a minha profunda gratidão por ter aceitado me orientar neste trabalho e por ter sido sempre um exemplo de excelência e amor ao próximo.

Aos incontáveis amigos, expresso minha eterna gratidão por todo o apoio e companheirismo.

Agradeço, por fim, à banca examinadora por todos os comentários, críticas e outras formas de contribuição que foram essenciais para o enriquecimento do trabalho.

RESUMO

O conteúdo de carbono e atividade microbiana no solo, influenciados pelas práticas de manejo, têm sido muito utilizados como indicadores de qualidade. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito temporal do manejo de lavouras de café sobre a qualidade do solo, por meio da quantificação do estoque de carbono (EstC) e da respiração microbiana basal (RMS). O estudo foi conduzido no município de Araxá, MG, região do Triângulo Mineiro, através da retirada de amostras de solo em áreas de plantio de café com diferentes idades. Foram selecionadas áreas próximas de mesma classe de solo, com cafeeiros de diferentes idades, e uma área com mata nativa para ser tomada como referência de qualidade. Estas áreas foram consideradas como tratamentos, ou variável independente (grupo), sendo: 1. Mata Nativa; 2. Cafeeiro 0 anos; 3. Cafeeiro 11 anos; 4. Cafeeiro 26 anos. Em cada grupo foram aleatoriamente abertas cinco trincheiras até 60 cm de profundidade de onde foram retiradas as amostras de solo (indeformadas e deformadas) nas profundidades de 0 – 10 cm, 0 – 20 cm, 20 – 40 cm, 40 – 60 cm. A determinação do teor de carbono orgânico foi realizada pelo método de Walkley-Black, enquanto a RMS foi determinada pela metodologia de Stotzky. Foram avaliados ainda os parâmetros físicos como densidade aparente e textura, determinada pelo método da pipeta. Os resultados foram testados quanto a normalidade e foi realizada análise de variância em esquema fatorial 4 x 4 (tratamentos x profundidades). As médias foram comparadas por teste de Dunnett tomando a área de mata nativa como referência de qualidade. Os resultados apontam que o cafeeiro de 11 anos apresentou o maior estoque de carbono, diferindo de forma positiva da área mata nativa, a qual apresentou dados coerentes com a realidade de um cerrado preservado. Os demais tratamentos não interferiram significativamente no EstC e na RMS quando comparados à referência.

Palavras-chave: Carbono orgânico total; Qualidade do solo; Cafeicultura; Práticas conservacionistas.

ABSTRACT

Soil carbon content and microbial activity, influenced by management practices, have been widely used as quality indicators. This study aimed to evaluate the temporal effect of coffee crop management on soil quality through the quantification of the soil organic carbon stock (SOC stock) and soil basal respiration (SBR). The study was conducted in the municipality of Araxá, MG, in the Triângulo Mineiro region, by collecting soil samples in coffee plantation areas of different ages. Nearby areas of the same soil class were selected, featuring coffee plants of different ages, along with a native forest area to serve as a quality reference. These areas were considered as treatments, or independent variables (groups), as follows: 1. Native Forest; 2. 0-year-old coffee; 3. 11-year-old coffee; 4. 26-year-old coffee. In each group, five trenches were randomly opened up to a depth of 60 cm, from which soil samples (undisturbed and disturbed) were collected at depths of 0 – 10 cm, 10 – 20 cm, 20 – 40 cm, and 40 – 60 cm. The determination of organic carbon content was performed using the Walkley-Black method, while the SBR was determined using Stotzky's methodology. Physical parameters such as bulk density and texture, determined by the pipette method, were also evaluated. The results were tested for normality, and an analysis of variance was performed in a 4 x 4 factorial design (treatments x depths). The means were compared using Dunnett's test, taking the native forest area as the quality reference. The results indicate that the 11-year-old coffee plantation showed the highest carbon stock, differing positively from the native forest area, which presented data consistent with the reality of a preserved Cerrado. The other treatments did not significantly affect SOC stock and SBR when compared to the reference.

Keywords: Total organic carbon; Soil quality; Coffee farming; Conservation practices.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo Geral.....	10
2.2. Objetivos Específicos.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Determinação do Carbono Orgânico Total	13
3.2. Determinação da Densidade do Solo	14
3.3. Determinação do Estoque de Carbono.....	14
3.4. Determinação da Respiração Microbiana Basal	15
3.5. Determinação da Textura do Solo.....	16
3.6. Análise Estatística.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1. Teor de Carbono Orgânico Total	17
4.2. Estoque de Carbono	18
4.3. Respiração Microbiana Basal	20
4.4. Associação com a Respiração Microbiana Basal.....	21
4.5. Associação com a Textura do Solo	22
5. CONCLUSÕES.....	24
6. REFERÊNCIAS.....	25

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado historicamente como o maior produtor e exportador mundial de café, desempenhando um papel central na segurança alimentar e na balança comercial do agronegócio. Segundo o relatório semestral do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o país mantém sua liderança no cenário global, com uma produção estimada de 63 milhões de sacas de 60 kg para o ano comercial 2025/2026, o que representa cerca de 37% da oferta mundial (USDA, 2025). Dentre as regiões produtoras, o estado de Minas Gerais se destaca não apenas por sua produção, mas pela alta tecnificação das lavouras, o que o torna uma região extremamente competitiva.

Entretanto, a agricultura contemporânea enfrenta um novo paradigma: a pressão global por sustentabilidade ambiental. Mercados consumidores cada vez mais exigentes têm imposto barreiras não tarifárias ligadas à pegada de carbono e à preservação ambiental, tornando evidente a importância de um manejo conservacionista. Nesse contexto, a cafeicultura moderna não é mais avaliada apenas pela produtividade, mas pela capacidade de prover serviços ambientais, mitigando a vulnerabilidade do agroecossistema, que ameaça a própria viabilidade do cultivo a longo prazo. Segundo Mendonça (2023), a manutenção do conteúdo orgânico do solo é determinante para a sua estabilidade estrutural, garantindo a longevidade da lavoura estabelecida.

A gestão sustentável do solo é fundamental para assegurar a resiliência e a manutenção do equilíbrio ambiental. O solo ocupa uma posição evidente, configurando-se como o maior reservatório de carbono orgânico terrestre, com estoque de, aproximadamente, 1500 Pg de C (LAL, 2004). Essa relevância o torna um fator primordial na atenuação dos gases de efeito estufa (GEE), especialmente o CO₂. Ressalta-se que o manejo realizado nas áreas agrícolas tem influência direta no incremento de carbono do solo, validando o teor de carbono orgânico total (COT) como um excelente indicador de boas práticas agrícolas (EMBRAPA, 2021).

Nesse sentido, o cafeeiro, sendo uma planta perene e lenhosa, possui características morfofisiológicas vantajosas para o acúmulo de carbono no solo. De acordo com o observado por Junior *et al.*, (2022) o sequestro de carbono de lavouras das variedades Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19, avaliadas aos 3,5 anos de idade, foi, aproximadamente, 3,6 vezes maior que as emissões quantificadas no campo. Tal eficiência se deve à partição de fotoassimilados pelo cafeeiro, priorizando a formação de tecidos lignificados que garantem o sequestro do carbono a longo prazo. Simultaneamente, a formação de um sistema radicular profundo e vigoroso,

característico da espécie, atua como importante compartimento de estocagem subterrânea (SILVA *et al.*, 2014).

Sob a ótica do Cerrado, bioma predominante no Triângulo Mineiro, percebe-se que a conversão de áreas nativas para sistemas conservacionistas de cafeicultura tem demonstrado não apenas a capacidade de manutenção, mas, em muitos casos, o incremento dos estoques de carbono no solo. Estudos recentes têm revelado resultados extremamente relevantes nesse sentido. Um amplo levantamento realizado por Felizardo (2022) indica um estoque de carbono médio de 44,70 Mg ha⁻¹ para áreas com vegetação nativa do Cerrado. Belizário *et al.* (2018), por sua vez, observaram um estoque de 71,98 Mg ha⁻¹ em uma área cultivada com café de 8 anos nesse mesmo bioma. Esse expressivo contraste evidencia que o manejo adotado na cafeicultura é capaz de superar a linha de base do ecossistema original, consolidando a cultura como um importante sumidouro carbono.

Nesse contexto, devido a sua natureza perene, a cafeicultura se estabelece intrinsecamente como uma atividade de viés conservacionista. O mínimo revolvimento do solo, somado à adoção de uma cobertura permanente, contribui significativamente para a manutenção da qualidade edáfica, protegendo a matéria orgânica superficial da radiação e da oxidação (MAGALHÃES *et al.*, 2024). Tal proteção é consolidada através da prática conhecida como *organic mulching*, formando uma barreira física composta pela serapilheira proveniente de resíduos vegetais do cafeeiro e das plantas de cobertura, convertendo o solo em um habitat biologicamente ativo e estável.

Alinhado aos benefícios diretos da adoção de práticas conservacionistas, o manejo sustentável do cafeeiro ultrapassa os limites da esfera produtiva e ganha nova relevância jurídica com o advento da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, instituída pela Lei nº 14.119/2021 (BRASIL, 2021). A legislação vigente oferece a segurança legal necessária para converter os estoques de carbono em ativos financeiros transacionáveis, através do mercado de créditos de carbono, transformando a preservação em ativo ambiental. O avanço dessas políticas culminou recentemente na instituição do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), através da sanção da Lei nº 15.042/2025 (BRASIL, 2025). Entretanto, o setor ainda carece de regulamentações específicas e metodologias calibradas para a realidade tropical (MAIA *et al.*, 2022).

Em paralelo, torna-se relevante o estudo da qualidade biológica do solo, visto que este constitui um habitat dinâmico e altamente complexo. A funcionalidade desse sistema é

governada pela comunidade microbiana, protagonista na decomposição de resíduos vegetais, ciclagem de nutrientes e mineralização da matéria orgânica (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). Mendes *et al.*, (2016) propõem que a microbiota, aliada aos aspectos físicos e químicos do solo, influencia em conjunto não somente a produtividade e a sustentabilidade da atividade, mas também os seus serviços ambientais prestados. Adicionalmente, a utilização de bioindicadores é altamente recomendada para monitorar o manejo do solo, dada a sua elevada sensibilidade em detectar alterações precoces no sistema (LISBOA *et al.*, 2012).

A atividade metabólica dos microrganismos do solo implica na regulação do fluxo de carbono entre solo e atmosfera, através da liberação de CO₂ por meio da respiração microbiana (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Assim, a respiração microbiana basal (RMS) destaca-se como um bioindicador capaz de refletir o impacto do manejo no nível de atividade dos microrganismos associados à matéria orgânica disponível (GUIMARÃES *et al.*, 2017). Nesse sentido, sua interpretação pode inferir sobre o equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização, indicando se o manejo atua de forma positiva ou negativa no sequestro de carbono, essencial para validar a sustentabilidade da cafeicultura (SILVA *et al.*, 2013).

Diante do exposto, a proposta do trabalho foi avaliar a qualidade do solo, por meio da respiração microbiana basal, e quantificar se houve ou não o incremento de estoques de carbono orgânico em diferentes profundidades em lavouras de café com 0, 11 e 26 anos, comparadas a uma área de vegetação nativa. Espera-se que, assim, sejam gerados dados que validem o potencial conservacionista da cafeicultura na região do Triângulo Mineiro e subsidiem sua inserção em iniciativas de agricultura de baixo carbono.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Objetivou-se quantificar o estoque de carbono do solo e a respiração microbiana basal em sistemas cafeeiros de diferentes idades.

2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar o teor de carbono orgânico das áreas estudadas nas profundidades 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm;
2. Estimar o estoque de carbono até 60 cm de profundidade nas áreas estudadas;
3. Determinar a densidade aparente do solo até 60 cm de profundidade;
4. Determinar a textura do solo para as camadas 0-20 cm e 20-40 cm;
5. Determinar a respiração microbiana basal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma propriedade agrícola localizada na zona rural do município de Araxá, Minas Gerais, Brasil (19° 36' 22.74" S 46° 53' 19.23" O) (Figura 1). A altitude da área estudada variou de 1010 a 1040 m, com precipitação anual aproximada de 1500 mm e temperatura média anual de 20,8 °C. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região de estudo é o Cwa, caracterizado por invernos secos e verões quentes e chuvosos (ALVARES *et al.*, 2013). Alinhado à sazonalidade hídrica característica do clima da região, é relevante pontuar que as lavouras avaliadas são conduzidas em regime de sequeiro, sem emprego de sistemas de irrigação.

Os tratamentos derivaram de três áreas com lavouras de café (*Coffea arabica* L.) consolidadas e uma área coberta por vegetação nativa, sendo as lavouras de diferentes idades (0, 11 e 26 anos). Dessa forma, determinou-se 4 tratamentos: T1. Mata Nativa (MN) - Referência; T2. Cafeeiro com 0 anos (C0) – Variedade Paraíso; T3. Cafeeiro com 11 anos (C11) – Variedade Topázio; T4. Cafeeiro com 26 anos (C26) – Variedade Catuaí 144. As áreas foram definidas através do uso de imagens de satélite fornecidas pelo software *Google Earth Pro*, sendo escolhidos de forma aleatória (acompanhando o relevo), em cada área, 4 pontos referentes às repetições.



Figura 1 – Imagem de satélite da área de estudo, destacando os pontos amostrais. Pontos 1, 2, 3 e 4: Mata Nativa (MN); Pontos 5, 6, 7 e 8: Cafeeiro com 0 anos (C0); Pontos 9, 10, 11 e 12: Cafeeiro com 26 anos (C26); Pontos 13, 14, 15 e 16: Cafeeiro com 11 anos (C11). Fonte: *Google Earth Pro*, 2026.

As amostras foram coletadas no mês de outubro de 2025, estabelecendo-se a área útil para a abertura de trincheiras e pontos amostrais a 1 m a partir da extremidade da saia do cafeeiro, na entrelinha. Inicialmente, após a remoção da serapilheira, coletou-se amostras deformadas na profundidade de 0-10 cm, utilizadas posteriormente para a determinação da respiração microbiana basal (RMS). As amostras indeformadas, utilizadas para a determinação da densidade aparente (Ds), foram coletadas através de anéis de Kopecky nas profundidades: 0-20, 20-40, 40-60 cm. Amostras deformadas também foram coletadas nessas profundidades para a determinação do teor de carbono orgânico total (COT) e posterior cálculo do estoque de carbono.

Durante a coleta do material, as amostras foram armazenadas em sacos plásticos e identificadas para o posterior transporte para o Laboratório de Pedologia (LAPED), localizado no Bloco 2E do Campus Umuarama da Universidade Federal de Uberlândia. As amostras foram

secas em temperatura ambiente e posteriormente peneiradas em malha de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

3.1. Determinação do Carbono Orgânico Total

A determinação do COT foi realizada através de uma adaptação da metodologia de Walkley & Black (YOEMANS & BREMNER, 1988), cujo princípio se baseia na oxidação do carbono orgânico pelo dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), em meio ácido. Entretanto, o procedimento realizado para este estudo, ao contrário da metodologia original, não adotou o aquecimento externo das amostras em bloco digestor, sendo a energia necessária para a reação fornecida exclusivamente pelo calor liberado na reação exotérmica decorrente da adição do ácido sulfúrico concentrado.

Para a realização da análise, as amostras de TFSA foram trituradas e passadas em peneira de 0,5 mm. Pesou-se 500 mg de solo de cada amostra, sendo essa alíquota transferida para erlenmeyers de 250 ml. Em seguida, adicionou-se 5 mL da solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. A suspensão foi homogeneizada em temperatura ambiente e deixada em repouso para o resfriamento natural.

Após a reação e o posterior resfriamento, adicionou-se água destilada nas amostras, completando-as para um volume aproximado de 100 mL. Em seguida, as amostras foram tituladas com solução de sulfato ferroso amoniacal ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, através da adição de, aproximadamente, 3 gotas do indicador difenilamina (ferorin). Além disso, foram preparadas amostras “branco”, contendo apenas reagentes, para estabelecer o volume de referência da solução oxidante e permitir o cálculo, por diferença, da quantidade de dicromato consumida exclusivamente pela oxidação do carbono orgânico da amostra.

O cálculo do conteúdo de carbono orgânico das amostras se dá pela Equação 1:

$$\text{Equação 1: } CO = \frac{(A) * [\text{Sal de Mohr}] * 0,003 * 100}{\text{Massa das amostras}}$$

Sendo: $A = B - S$

CO = Carbono Orgânico em (dag kg⁻¹);

B = Volume titulado para o branco (mL);

S = Volume titulado para as amostras (mL);

[Sal de Mohr] = Concentração do Sal de Mohr – Sulfato Ferroso Amoniacal (mol L⁻¹);

0,003 = Peso equivalente do carbono;

100 = Fator de conversão.

3.2. Determinação da Densidade Aparente do Solo

Para a determinação da densidade aparente do solo (Ds), foram colocadas em estufa placas de petri contendo amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos de volume conhecido, sob temperatura de 105 °C por, aproximadamente, 24 h (até se atingir um valor de massa constante). Em seguida, as amostras foram resfriadas em temperatura ambiente e pesadas em balança analítica, obtendo-se o valor da massa seca.

O cálculo da densidade aparente do solo se dá pela Equação 2:

Equação 2:
$$Ds = \frac{M_{s+p} - M_p}{V}$$

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

M_{s+p} = Massa de solo seco + Massa da placa de petri (g);

M_p = Massa da placa de petri (g);

V = Volume do anel de Kopecky (cm³).

3.3. Determinação do Estoque de Carbono

A determinação do estoque de carbono (Est C) é dada pela Equação 3:

Equação 3:
$$Est\ C = \frac{Ds * CO * e}{10}$$

Est C = Estoque de carbono (Mg ha^{-1});

CO = Teor de carbono orgânico (kg dm^{-3});

Ds = Densidade aparente do solo (kg dm^{-3});

e = Espessura da camada (cm).

3.4. Determinação da Respiração Microbiana Basal

A quantificação da respiração microbiana basal (RMS) foi realizada pela metodologia de Stotzky (1965), através da incubação de frascos em BOD a 25 °C e posterior titulação após 3, 7, 14 e 21 dias. Em cada frasco, contendo 100 g de amostra com umidade corrigida para 50% da capacidade de campo, posicionou-se um copo plástico com capacidade de 40 mL contendo 10 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol L⁻¹. A quantificação do CO₂ capturado se deu pela titulação do excesso de NaOH com ácido clorídrico (HCl) 0,5 mol L⁻¹, após a adição de cloreto de bário (BaCl₂) 1 mol L⁻¹ e fenolftaleína (1%). Adicionalmente, foram tituladas amostras “branco”, contendo apenas NaOH, para a realização do cálculo pela diferença de CO₂ capturado.

O cálculo realizado para a determinação da RMS é descrito pela Equação 4:

Equação 4:
$$RMS = \frac{[(B - A) * MC * MHCl]}{Ms * 2}$$

RMS = Respiração microbiana basal ($\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo seco);

B = Volume titulado para o branco (ml);

A = Volume titulado para a amostra (ml);

MC = Massa atômica C (g mol^{-1});

MHCl = Molaridade HCl (mol L^{-1});

Ms = Massa seca do solo (g).

3.5. Determinação da Textura do Solo

A análise granulométrica para a determinação da textura do solo foi realizada pelo método da pipeta, conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017) no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da Embrapa. O método é fundamentado no princípio da sedimentação de partículas em meio líquido, descrito pela Lei de Stokes.

Inicialmente, realizou-se a dispersão química das amostras por meio da solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol L⁻¹, seguida de agitação mecânica lenta por 16 horas para garantir a completa desestruturação dos agregados do solo e separação das frações granulométricas. Posteriormente, a suspensão foi vertida em um conjunto de peneiras com malhas de 2 mm e 0,053 mm para a separação das frações areia grossa (AG) e areia fina (AF), respectivamente. A suspensão restante é vertida em uma proveta graduada e completada com água deionizada para o volume de 1 L. Após a homogeneização da amostra, realizou-se a pipetagem de alíquotas de 25 mL após o tempo pré-determinado de 4 minutos para a fração silte (S) e 4 horas para a fração argila (A). Por fim, o material coletado foi seco a 105°C e a textura determinada por proporção de massas através de pesagem em balança analítica.

3.6. Análise Estatística

Os dados obtidos foram analisados quanto a normalidade e submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste de F para avaliar os efeitos isolados e a interação do esquema fatorial 4 x 4 (tratamentos x profundidades). Quando constatada a significância estatística, aplicou-se o teste de Dunnett para a comparação de médias ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), visando contrastar as médias dos tratamentos unicamente em relação à área de referência (Mata Nativa). Para a análise dos dados, foi utilizado o software *RStudio*.

Adicionalmente, foi realizada a análise de correlação de Pearson, por meio do software *Microsoft Excel*, com o intuito de avaliar a intensidade e a direção da relação linear entre as variáveis quantitativas do solo analisadas no trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Teor de Carbono Orgânico Total

Os resultados médios do teor de carbono orgânico total para as áreas de café e mata nativa são apresentados na Figura 2. Os resultados confirmam o potencial conservacionista esperado para a cultura do cafeeiro, evidenciando sua capacidade de reter e incrementar carbono no solo ao longo do tempo. Percebe-se também o efeito da profundidade na dinâmica do COT no solo: as práticas culturais exercem maior efeito na camada superficial (0-20 cm), ao passo que nas camadas subsuperficiais (20-40 cm e 40-60 cm), os teores de COT se mantêm estáveis.

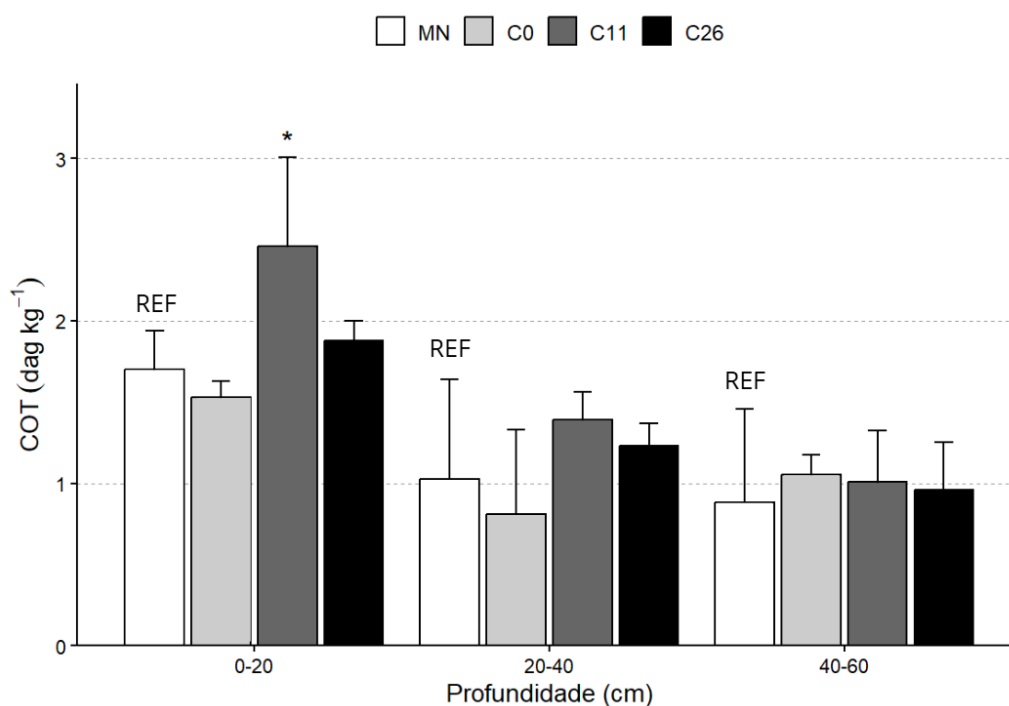


Figura 2 – Teores médios de COT nas profundidades 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm nos 4 tratamentos estudados (MN, Mata Nativa; C0, Cafeeiro 0 anos; C11, Cafeeiro 11 anos; C26, Cafeeiro 26 anos). Médias comparadas pelo Teste de Dunnett à referência (REF - MN) ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). (*) Tratamentos cujas médias diferiram estatisticamente.

Através da avaliação específica da camada de 0-20 cm, percebe-se o comportamento singular do Cafeeiro de 11 anos (C11), que apresentou a maior média, se destacando entre os tratamentos e diferindo de forma positiva da Referência - Mata Nativa (MN). O Cafeeiro de 26 anos (C26), por sua vez, não diferiu da MN e apresentou um menor valor médio quando

comparado com o C11. Esse resultado evidencia que o incremento de carbono no solo não ocorreu de forma linear com o tempo de cultivo. O Cafeeiro de 0 anos (C0) também não diferiu da referência e apresentou a menor média entre os 4 tratamentos. O incremento significativo observado no cafeeiro de 11 anos corrobora os achados de Rangel *et al.* (2007), que também constataram o aumento do COT na entrelinha após o mesmo período de cultivo. Essa dinâmica de acúmulo reforça as premissas de Silva *et al.* (2015), confirmando que a ausência de revolvimento do solo, aliada à consolidação de culturas perenes, é determinante para a preservação da estrutura do solo e a consequente manutenção e elevação do COT.

Adicionalmente, a resiliência do COT em subsuperfície é explicada pelo seu grau de estabilidade. A quase totalidade do elemento em profundidade encontra-se na forma de Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MOAM). Nesse estado, o carbono está fortemente adsorvido às superfícies das argilas e fisicamente protegido, fazendo com que o COT não seja facilmente alterado pela deposição superficial recente de resíduos orgânicos (LAVALLEE *et al.*, 2020). Dessa forma, a evolução temporal do manejo exerce papel crucial na qualidade do material estocado. A tendência natural da fração orgânica se estabilizar também foi observada por Gebrim (2010), que evidenciaram maiores estoques de carbono não lábil em lavouras de café de 30 anos quando comparadas a plantios mais jovens de 10 anos de idade.

4.2. Estoque de Carbono

A avaliação do estoque de carbono (EstC) revela um comportamento semelhante ao observado para o COT (Figura 3). A análise estatística evidencia uma média superior para o C11 quando comparado à MN, enquanto os demais tratamentos (C0 e C26) não diferem na comparação. Na fase de implantação (C0), o solo ainda preserva a herança do manejo anterior, enquanto na lavoura mais velha (C26), observa-se a consolidação do agroecossistema, através da estabilização do carbono orgânico. O efeito da profundidade também é observado nessa variável.

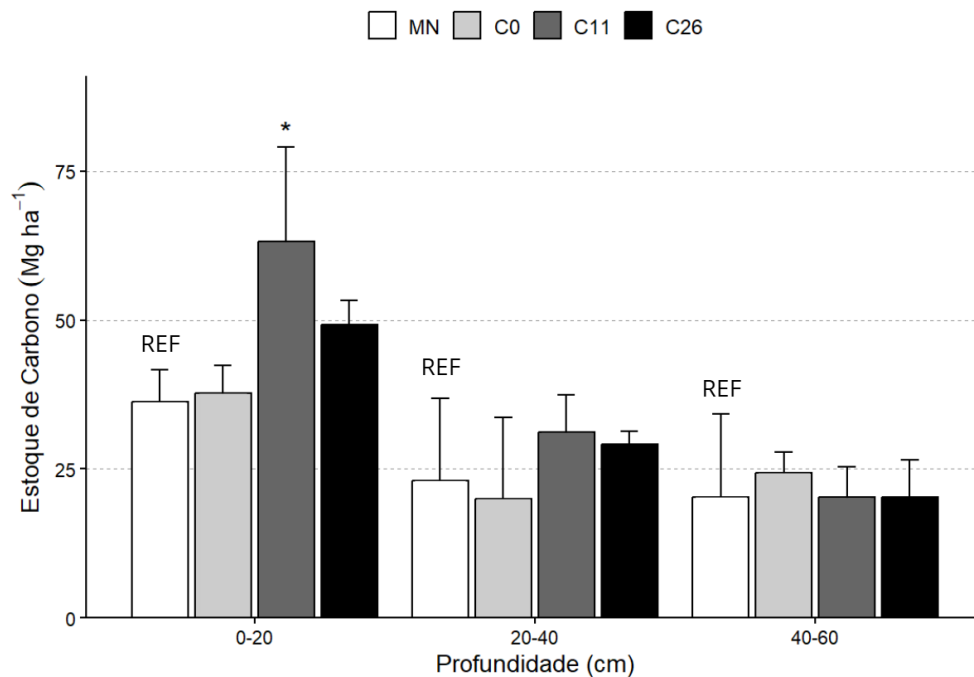


Figura 3 – Médias de EstC nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm nos 4 tratamentos estudados (MN, Mata Nativa; C0, Cafeeiro 0 anos; C11, Cafeeiro 11 anos; C26, Cafeeiro 26 anos). Médias comparadas pelo Teste de Dunnett à referência (REF - MN). (*) Tratamentos cujas médias diferiram estatisticamente.

Os resultados obtidos para a camada superficial (0-20 cm) revelam que a área de mata nativa apresentou uma média de $36,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor que atua como um referencial de qualidade edáfica para a área de estudo. Esse resultado alinha-se ao valor de base histórico do bioma, corroborando o levantamento clássico de Corazza *et al.* (1999), que indicou $39,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ para uma área de vegetação nativa do Cerrado.

Nesse sentido, estudos focados na camada superficial (0–20 cm) em agroecossistemas demonstram que as práticas conservacionistas são eficientes na manutenção da qualidade edáfica. Em um levantamento recente realizado no bioma Cerrado por Felizardo (2022), os valores encontrados para vegetação nativa preservada de EstC médio foram de $37,17 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor que se mantém equivalente aos estoques de áreas sob plantio conservacionista ($39,27 \text{ Mg ha}^{-1}$). Ao direcionar a análise para a cafeicultura, esse potencial mitigador se mostra ainda mais expressivo. Avaliando lavouras de café localizadas no município de Patrocínio, Minas Gerais, Belizário *et al.* (2018) quantificaram um EstC de $91,34 \text{ Mg ha}^{-1}$ na entrelinha do cafeeiro (37 anos de implantação) para a profundidade de 0-30 cm, superior ao valor encontrado na área de

Cerrado na mesma profundidade ($66,87 \text{ Mg ha}^{-1}$). Esse resultado indica que o manejo adotado na cafeicultura possibilita incrementos no estoque de carbono ao longo dos anos de cultivo.

4.3. Respiração Microbiana Basal

Os resultados da respiração microbiana basal (RMS) atestam a sustentabilidade biológica do manejo adotado (Figura 4 e Figura 5).

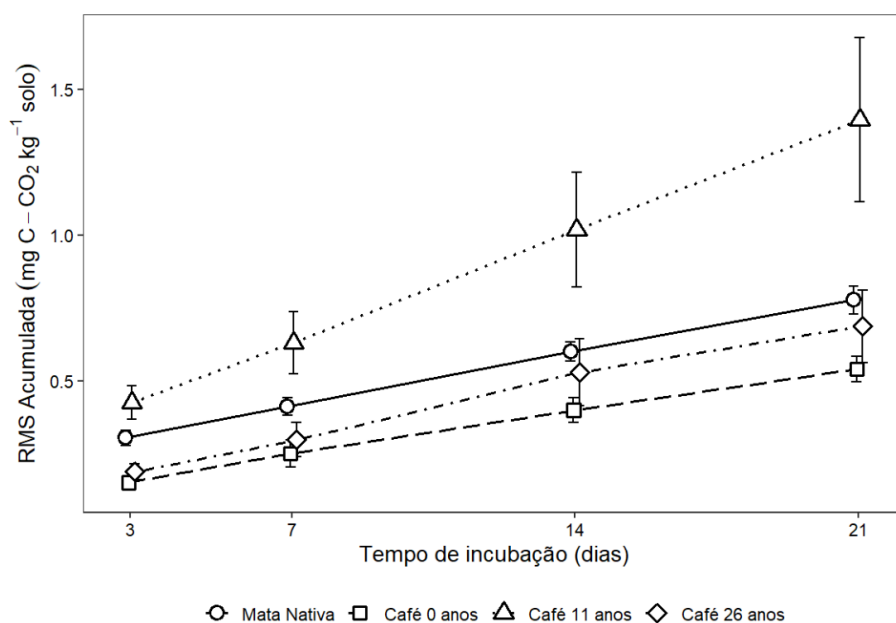


Figura 4 – RMS média acumulada na profundidade 0-10 cm nos 4 tratamentos estudados (Mata Nativa; Cafeeiro 0 anos; Cafeeiro 11 anos; Cafeeiro 26 anos).

A atividade biológica do solo foi proporcional à presença de carbono orgânico. O tratamento referente ao Cafeeiro de 11 anos (C11) apresentou a maior média de RMS acumulada durante toda a avaliação, reforçando que um sistema agrícola conservador tem a capacidade de ser produtivo e sustentável simultaneamente. A Mata Nativa, por sua vez, apresentou média superior aos demais tratamentos (Cafeeiro 26 anos – C26 e Cafeeiro 0 anos – C0), indicando que o ecossistema natural mantém um estado de clímax biológico contínuo. Essa resiliência, sustentada pela diversidade de substratos e ausência de distúrbios antrópicos, resulta em uma respiração microbiana basal superior à encontrada na área de C26, onde a

cinética biológica tende a se estabilizar, e a de implantação recente (C0), que ainda lida com os reflexos da transição de uso do solo.

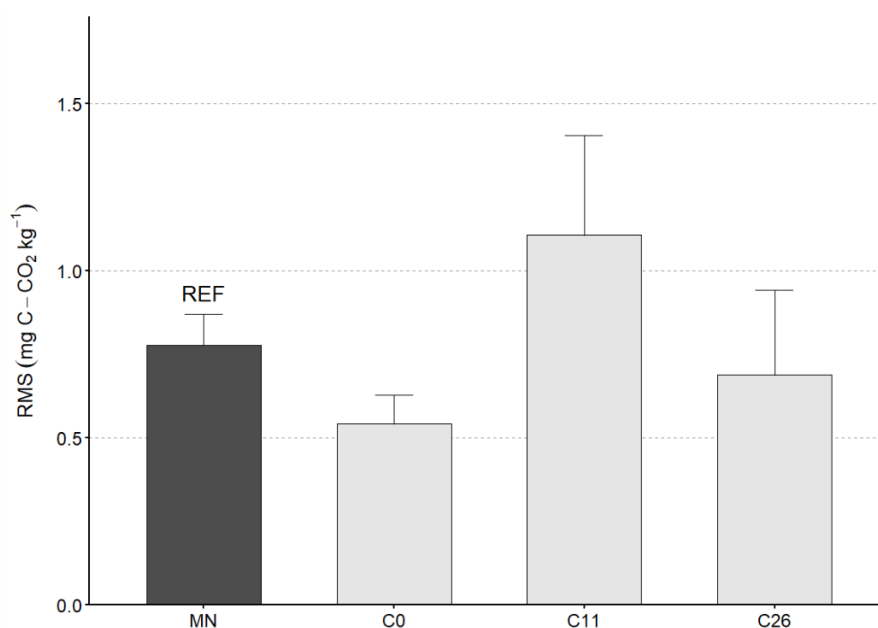


Figura 5 – RMS média acumulada na profundidade 0-10 cm nos 4 tratamentos estudados (MN, Mata Nativa; C0, Cafeeiro 0 anos; C11, Cafeeiro 11 anos; C26, Cafeeiro 26 anos). Médias comparadas pelo Teste de Dunnett à referência (REF - MN). (*) Tratamentos cujas médias diferiram estatisticamente.

Os valores de RMS quantificados nas áreas de café não diferiram significativamente da MN, corroborando o trabalho de Guimarães *et al.* (2017), que também constataram a manutenção da respiração basal em sistemas de café estabilizados no Cerrado em níveis comparáveis aos da vegetação original. Adicionalmente, a tendência natural de sistemas de agricultura perene em favorecer a preservação da microbiota se deve ao fornecimento ininterrupto de carbono lábil via sistema radicular e deposição de serapilheira, além de proteger o solo de processos erosivos.

4.4. Associação com a Respiração Microbiana Basal

Os coeficientes de correlação de Pearson (Tabela 1 e Tabela 2) evidenciam a relação linear esperada da RMS com o COT e o EstC. A atividade microbiana se mostrou intimamente

dependente da disponibilidade superficial de substrato, o que é comprovado pela associação positiva forte entre a RMS e o COT ($r \approx 0,81$) e entre a RMS e o EstC ($r \approx 0,74$). Esse alto grau de correlação corrobora as observações de Pezarico *et al.* (2013), que justificaram a maior taxa de RMS em sistemas conservacionistas devido à farta disponibilidade de frações de carbono lábil proporcionadas pelo contínuo aporte de biomassa no sistema.

Tabela 1: Coeficientes de Correlação de Pearson entre as variáveis de carbono (COT e EstC) na camada de 0-20 cm e a respiração microbiana basal (RMS).

Carbono Orgânico Total	Correlação com a RMS
COT 0-20	0,81
EstC 0-20	0,74

4.5. Associação com a Textura do Solo

Através da análise textural do solo (Tabela 3 e Tabela 4) foi possível classificar o solo da área de estudo como predominantemente de textura argilosa.

Tabela 3: Resultado da análise textural do solo na profundidade 0-20 cm. (MN, Mata Nativa; C0, Cafeeiro 0 anos; C11, Cafeeiro 11 anos; C26, Cafeeiro 26 anos).

Análise Textural 0-20 cm - Resultados Médios (g kg^{-1})				
Fração Granulométrica	MN	C0	C11	C26
Areia Grossa	110	221	167	231
Areia Fina	222	234	194	218
Silte	215	188	193	217
Argila	453	357	446	334

Tabela 4: Resultado da análise textural do solo na profundidade 20-40 cm. (MN, Mata Nativa; C0, Cafeeiro 0 anos; C11, Cafeeiro 11 anos; C26, Cafeeiro 26 anos).

Análise Textural 20-40 cm - Resultados Médios (g kg^{-1})				
Fração Granulométrica	MN	C0	C11	C26
Areia Grossa	141	184	153	201
Areia Fina	204	229	179	214
Silte	197	160	228	231
Argila	458	427	440	354

A quantificação das frações granulométricas evidenciou teores de argila variando entre 310 e 521 g kg⁻¹, areia total entre 235 e 531 g kg⁻¹ e silte entre 127 e 292 g kg⁻¹. A predominância de frações de granulometria mais fina é fundamental na dinâmica do estoque de carbono, uma vez que atua na proteção física do conteúdo orgânico do solo ao isolá-lo no interior de micro agregados, reduzindo a sua taxa de mineralização (SIX *et al.*, 2002).

A análise dos coeficientes de correlação de Pearson (Tabela 5 e Tabela 6) revela que a relação entre as frações granulométricas e o COT são majoritariamente fracas, especialmente na camada superficial (0-20 cm). O comportamento observado indica que outros fatores foram predominantes em relação à influência física da textura do solo na dinâmica do COT.

Tabela 5: Coeficiente de Correlação de Pearson entre a textura do solo e o teor de carbono orgânico total (COT) na profundidade 0-20 cm.

Textura do Solo 0-20 cm	Correlação com o COT
Areia Grossa	0,05
Areia Fina	-0,34
Silte	-0,10
Argila	0,19

Tabela 6: Coeficiente de Correlação de Pearson entre a textura do solo e o teor de carbono orgânico total (COT) na profundidade 20-40 cm.

Textura do Solo 20-40 cm	Correlação com o COT
Areia Grossa	-0,11
Areia Fina	-0,35
Silte	0,52
Argila	-0,11

Em subsuperfície, é possível observar uma correlação positiva ($r \approx 0,52$) entre o teor de silte e o COT na camada de 20-40 cm, um comportamento análogo ao reportado por Zhao *et al.* (2024) em áreas de pastagem ($r \approx 0,47$). Além disso, percebe-se uma moderada correlação negativa entre a areia fina e o COT nas profundidades 0-20 cm ($r \approx -0,34$) e 20-40 cm ($r \approx -0,35$), reforçando que o COT está comumente associado às frações de granulometria menores que 0,05 mm.

5. CONCLUSÕES

O estudo evidenciou que o manejo adotado na cafeicultura foi capaz de preservar o carbono do solo em níveis comparáveis ao ecossistema natural, validando o cafeeiro como uma cultura de viés conservacionista.

A área de café com cultivo consolidado há 11 anos se mostrou superior nos parâmetros de COT e EstC em superfície (0-20 cm), enquanto, em subsuperfície (20-40 cm e 40-60 cm), o tempo de cultivo (0, 11 e 26 anos) não interferiu de forma significativa no COT e no EstC.

A respiração microbiana basal das áreas cafeeiras não diferiu da área de mata nativa.

Constatou-se uma forte correlação entre a respiração microbiana basal e o COT, bem como uma correlação positiva moderada entre o teor de silte e o COT na camada de 20-40 cm.

Esse cenário evidencia que sistemas cafeeiros manejados adequadamente podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, além de favorecer a conservação do solo e a manutenção da função do agroecossistema como reservatório de carbono e atividade microbiológica.

6. REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BELIZÁRIO, M. H.; FERRÃO, G. E.; CERRI, C. C.; SIQUEIRA NETO, M. Soil carbon stocks cultivated with coffee in the brazilian savana: Effect of cultivation time and use of organic compost. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 53-62, 2018.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui o Pagamento por Serviços Ambientais – PSA, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jan. 2021.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 22 de dezembro de 2025. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 dez. 2025.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221 p. Disponível em:
<https://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/109>.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

EMBRAPA. **Sistema de Produção de Café: Manejo e Conservação do Solo**. 2. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021.

FELIZARDO, L. M. **Estoque de carbono nos biomas brasileiros com enfoque no cerrado e no cultivo de eucalipto no Mato Grosso do Sul**. 2022. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2022.

GEBRIM, F. O. **Estoques e qualidade da matéria orgânica em solos cultivados com cafeeiro sob diferentes manejos, em regiões de Minas Gerais**. 2010. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

GUIMARÃES, N. de F.; GALLO, A. de S.; FONTANETTI, A.; MENEGHIN, S. P.; SOUZA, M. D. B. de; MORINIGO, K. P. G.; SILVA, R. F. da. Biomassa e atividade microbiana do solo

em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 40, n. 1, p. 34-44, 2017. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/16425>.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261-273, 2020.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 45-55, 2012.

MAGALHÃES, T. M.; RECKZIEGEL, R. B.; PAULINO, J. Soil organic carbon in tropical shade coffee agroforestry following land-use changes in Mozambique. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 8, n. 1, 2025.

MAIA, S. M. F.; MEDEIROS, A. de S.; SANTOS, T. C. dos; LYRA, G. B.; LAL, R.; ASSAD, E. D.; CERRI, C. E. P. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105368, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105368>.

MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos.; LOPES, A. A. de C. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018. 24 p. (Circular Técnica, 38).

MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica e a sustentabilidade da agricultura. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 1-46.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

OLIVEIRA JÚNIOR, G. A.; RIBEIRO, V. da S.; APARECIDO, L. E. de O.; FIGUEIREDO, F. C.; REZENDE, R. N.; REZENDE, A. P. da S.; BRITO, J. P. C. Carbon balance in the production of arabica coffee. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, 2022.

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 40-47, 2013.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoque e frações da matéria orgânica de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1341-1353, 2007.

SILVA, A. B. da.; MANTOVANI, J. R.; MOREIRA, A. L.; REIS, R. L. N. Estoques de carbono no solo e em plantas de cafeeiro. **Interciência**, v. 39, n. 6, 2014.

SILVA, V. M.; TEIXEIRA, A. F. R.; SOUZA, J. L.; GUIMARÃES, G. P.; BENASSI, A. C.; MENDONÇA, E. de S. Estoques de carbono e nitrogênio e densidade do solo em sistemas de adubação orgânica de café conilon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1436-1444, 2015.

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

STOTZKY, G. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Coffee: World Markets and Trade**. Washington, DC: Foreign Agricultural Service, dez. 2025. Disponível em: <https://fas.usda.gov/data/coffee-world-markets-and-trade>.

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

ZHAO, M.; ZHANG, Z.; LI, M.; GAO, C.; ZHANG, J.; HE, N. Soil mineral-associated organic carbon and its relationship to clay minerals across grassland transects in China. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, n. 5, p. 2061, 2024.