



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FRAÇÕES DE CARBONO E DENSIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE CANA-
DE-AÇÚCAR SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO LOCALIZADO**

JOÃO PAULO BORGES CASAROTI

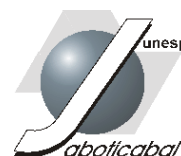
ENGENHARIA AGRONÔMICA

Jaboticabal – SP

2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



i

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FRAÇÕES DE CARBONO E DENSIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE CANA-
DE-AÇÚCAR SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO LOCALIZADO**

JOÃO PAULO BORGES CASAROTI

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação
em ENGENHARIA AGRÔNOMICA.

Jaboticabal - SP
1º Semestre/2026

C335f Casaroti, João Paulo Borges

Frações de carbono e densidade do solo em áreas de cana-de-açúcar sob plantio direto e preparo localizado / João Paulo Borges Casaroti. -- Jaboticabal, 2026

49 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Carolina Fernandes

Coorientadora: Ingrid Silva Setúbal

1. Cana-de-açúcar. 2. Agricultura sustentável. 3. Matéria orgânica. 4. Solos Teor de carbono. 5. Latossolos. I. Título.

João Paulo Borges Casaroti

**FRAÇÕES DE CARBONO E DENSIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO LOCALIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em **Engenharia Agrônoma**.

Orientador: Profa. Dra. Carolina Fernandes

Coorientador (se houver): Dra. Ingrid Silva Setúbal

Área de Concentração: Física do Solo

Trabalho aprovado em 11/07/2026

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Carolina Fernandes

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Profa. Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Dra. Júlia Karoline Rodrigues das Mercês

UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Prof. Dr. Mara Cristina Pessoa da Cruz
Chefe do Departamento

Aos meus pais, Paulo César Casaroti e Débora Perera Borges Casaroti, que sempre apoiaram minhas decisões, e que fizeram de tudo e mais um pouco para investir nos meus estudos e na minha vida.

DEDICO

À minha orientadora, Carolina Fernandes, à minha coorientadora, Ingrid Silva Setúbal, e a Cláudia Campos Dela Marta que corroboraram para a apresentação deste trabalho, por toda a aprendizagem, pela amizade, paciência e dedicação.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A priori à Deus, por sempre iluminar e me mostrar o melhor caminho, e sempre ter fé para cada dia ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais, Paulo César Casaroti e Débora Pereira Borges Casaroti, por todo amor, proteção, confiança, incentivo e investimento.

Aos meus avós, Angelina Pascaculis Casaroti, Aurélia Pereira Borges (*in memoriam*), Roberto Casaroti (*in memoriam*), Carício Borges (*in memoriam*) pelo carinho e amor.

À minha Irmã Yara Borges Casaroti, e aos meus irmãos, Pedro Borges Casaroti e Juliano Borges Casaroti, por todo apoio e carinho, e por sempre estarem presentes.

À minha orientadora, Carolina Fernandes, pela amizade, por toda aprendizagem, pela amizade, paciência e dedicação.

À Claudia Campos Dela Marta pela paciência, ensinamentos e auxílio nas atividades laboratoriais.

À Ingrid Silva Setúbal pela contribuição inestimável na conclusão do trabalho de iniciação científica que deu origem a este trabalho.

Aos meus amigos, João Vítor Delavechia Guimarães e Felipe Lino Anaga, pela cooperação, irmandade, aprendizado e amizade.

À Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPe) pelo auxílio com a bolsa de iniciação científica.

Aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Física do Solo (GPFiS) pelos ensinamentos.

A todos os meus familiares por todo amor, suporte e incentivo, e a todos que fizeram parte da minha trajetória, profissional e pessoal.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1 Agricultura conservacionista	6
2.2 A reforma do canavial e a rotação de culturas	7
2.3 Sistemas de Preparo	9
2.4 Indicadores de qualidade do solo	10
2.5 Densidade do solo e densidade de partículas	11
2.6 Matéria orgânica e as frações de carbono	13
2.7 Dinâmica do carbono no solo e perspectivas de estocagem	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5. CONCLUSÃO	33
6. REFERÊNCIAS.....	34

RESUMO

A mobilização intensiva do solo na cultura da cana-de-açúcar, associada à elevada frequência de operações mecanizadas, compromete a estrutura do solo e as reservas de matéria orgânica, o que torna relevante a adoção de sistemas conservacionistas de manejo. Objetivou-se avaliar o impacto dos sistemas de plantio direto (PD) e preparo localizado (PL) sobre as frações de carbono e a densidade do solo. A pesquisa foi conduzida em uma área com Latossolo Vermelho distrófico de textura média, onde foram adotados dois sistemas de manejo após a colheita de soja: o PL, com subsolagem no sentido das linhas, e o PD, caracterizado pela ausência da operação de subsolagem. A amostragem de solo foi realizada na fase de pleno desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, com a coleta em 10 pontos nas áreas úteis de cada manejo, em duas camadas de profundidade: 0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Nas amostras deformadas, coletadas com o auxílio do trado do tipo holandês, procedeu-se com a determinação do carbono orgânico do solo (COS) e o seu fracionamento físico para quantificar o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM). Nas amostras indeformadas, coletadas com o amostrador do tipo Uhland em anéis volumétricos com dimensões de 0,05 x 0,05 m, foi determinada a densidade do solo (Ds). Para a caracterização dos tratamentos e análise dos atributos, foi utilizada a estatística descritiva a fim de obter a média e o erro padrão. Na camada superficial de 0 a 0,10 m, o sistema PL apresentou um acúmulo maior de COS, sendo cerca de 2,7 vezes superior ao observado no PD, enquanto na camada de 0,10 a 0,20 m o cenário se inverteu, com o PD apresentando valores 19,1% mais elevados que o PL. A fração COP apresentou valores semelhantes entre os dois manejos em ambas as camadas avaliadas. Já a fração COAM seguiu tendência semelhante à do COS, com maiores teores na superfície sob PL e enriquecimento nas camadas mais profundas sob PD. Em relação à Ds, não foram observadas diferenças na camada superficial, mas na profundidade de 0,10 a 0,20 m, o PD resultou em valores aproximadamente 5,7% maiores que o PL. Assim, concluiu-se que o preparo localizado proporciona o acúmulo de carbono orgânico na superfície, enquanto o plantio direto favorece esse acúmulo na camada subsuperficial, demonstrando que os sistemas de manejo afetam tanto a quantidade quanto a distribuição do carbono ao longo do perfil do solo.

Palavras-Chave: Cana-de-açúcar; agricultura sustentável; matéria orgânica; Solos Teor de carbono; Latossolos.

ABSTRACT

The intensive soil tillage in sugarcane cultivation, associated with the high frequency of mechanized operations, compromises soil structure and organic matter reserves, making the adoption of conservation management systems relevant. The objective of this study was to evaluate the impact of no-till (NT) and localized tillage (LT) systems on carbon fractions and soil bulk density. The research was conducted in an area with medium-textured dystrophic Red Latosol, where two management systems were implemented following the soybean harvest: LT, involving subsoiling in the direction of the rows, and NT, characterized by the absence of subsoiling. Soil sampling was performed during the full vegetative development stage of the sugarcane, with samples collected from 10 points within the useful areas of each management system at two depth layers: 0 to 0.10 m and 0.10 to 0.20 m. In the disturbed samples, collected using a Dutch-type auger, soil organic carbon (SOC) was determined, along with its physical fractionation to quantify particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC). In the undisturbed samples, collected using a Uhland-type sampler in volumetric rings (0.05 x 0.05 m), soil bulk density (BD) was measured. Descriptive statistics were used for treatment characterization and attribute analysis to determine the mean and standard error. In the 0 to 0.10 m surface layer, the LT system showed a higher accumulation of SOC, approximately 2.7 times higher than that observed in NT, whereas in the 0.10 to 0.20 m layer, the results were reversed, with NT values being 19.1% higher than LT. The POC fraction showed similar values between both management systems in both evaluated layers. The MAOC fraction followed a similar trend to SOC, with higher levels on the surface under LT and enrichment in deeper layers under NT. Regarding BD, no significant differences were observed in the surface layer; however, at the 0.10 to 0.20 m depth, NT resulted in values approximately 5.7% higher than LT. Thus, it was concluded that localized tillage promotes organic carbon accumulation on the surface, while no-till favors accumulation in the subsurface layer, demonstrating that management systems affect both the quantity and the distribution of carbon throughout the soil profile.

Keywords: Sugar cane; sustainable agriculture; organic matter; Soils Carbonate content; Oxisol.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é originária do Sudeste Asiático, abrangendo regiões como Polinésia, Nova Guiné, Índia e China. A cultura foi introduzida na América e na África por portugueses e espanhóis, consolidando-se como uma das principais commodities agrícolas da história. No Brasil Colônia a cana-de-açúcar assumiu a posição central da economia, baseada no sistema monocultivo ocorrendo uma exploração de maneira insustentável do solo.

Atualmente a cultura da cana-de-açúcar continua sendo de extrema importância para o Brasil, tanto para a produção de combustível, o etanol, quanto para a produção de açúcar. Nesse contexto no Brasil foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) no ano de 1975 para diminuir a dependência nacional do petróleo importado. Atualmente, esse progresso é impulsionado por investimentos que são feitos acerca do desenvolvimento e produção de etanol,

a fim de reduzir as emissões de gases e impactos ambientais, considerado como combustível verde (Guarieiro et al. 2011).

A partir de 2015 a porcentagem de etanol contida na gasolina passou a ser de 27%, e em 1 de agosto de 2025 essa porcentagem aumentou para 30%. Para os próximos dez anos, projeta-se que o consumo e a produção de etanol no Brasil cresçam cerca de 2,1% ao ano, impulsionados pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída em 2017, que visa cumprir o compromisso de redução das emissões de gases de efeito estufa do Brasil (OCDE, 2025).

A esse cenário soma-se a consolidação dos mecanismos de precificação de carbono. A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) criou o Crédito de Descarbonização (CBIO), ativo escritural no qual cada crédito corresponde a uma tonelada de CO₂ que deixou de ser emitida. Mais recentemente, a Lei n. 15.042/2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), ambiente regulado submetido ao regime de limitação das emissões e de comercialização de ativos representativos de emissão, redução de emissão ou remoção de gases de efeito estufa no País (Brasil, 2024).

Embora a produção primária agropecuária não figure entre as atividades reguladas pelo SBCE, o produtor rural pode desenvolver projetos de carbono e transacionar créditos no mercado voluntário, o que confere valor econômico direto às práticas de manejo capazes de remover e estocar carbono no solo. Sistemas conservacionistas apresentam potencial de mitigação de emissões em áreas canavieiras, sobretudo pela manutenção da palhada e pela redução do revolvimento, que favorecem o acúmulo de carbono orgânico (Bordonal et al.,

2018). Dessa forma, a quantificação e o monitoramento dos estoques de carbono no solo deixam de constituir apenas indicador agrônomo de qualidade e passam a representar informação de interesse econômico, o que justifica o esforço em compreender como diferentes sistemas de manejo afetam não somente a quantidade total de carbono, mas também as frações em que ele se encontra e o seu tempo de permanência no perfil.

Tendo isso em vista, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, líder na produção de açúcar e o segundo maior produtor de etanol do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos. Para a safra 2025/26, a CONAB (2026) estima uma área colhida de 8,974 milhões de hectares, 2,4% superior à safra anterior, com produção prevista de 26,55 bilhões de litros de etanol e 45 milhões de toneladas de açúcar. Apesar da expansão da área cultivada, observa-se tendência de queda na produtividade a partir de dados da CONAB em 2024 e 2025, associada aos baixos índices pluviométricos, irregularidade das chuvas, excesso de calor e focos de incêndio que afetaram os canaviais da Região Centro-Sul, responsável por 91% da produção nacional.

A comparação dos indicadores das safras 2023/24 a 2025/26 revela um cenário de alerta para o setor sucroalcooleiro: embora a área cultivada tenha apresentado expansão contínua, a produção total registrou retrações sucessivas. Tal comportamento indica que a expansão horizontal da cultura não tem sido suficiente para compensar os efeitos de fatores abióticos adversos e de sistemas de manejo do solo inadequados. Entre os fatores que comprometem a produtividade, destaca-se a degradação física e química do solo decorrente do manejo intensivo, caracterizado pela elevada frequência de operações

mecanizadas, pela compactação subsuperficial, pela redução da estabilidade de agregados e pelas perdas progressivas de matéria orgânica (Conte et al., 2013; Cherubin et al., 2016).

Nesse cenário, faz-se necessário a utilização de tecnologias e práticas de manejo, que visem a melhoria de produção, juntamente com a preservação e conservação da estrutura física e química do solo. Tais características podem ser encontradas em sistemas conservacionistas do solo, como o sistema de plantio direto (PD) e preparo localizado (PL).

A implementação do PD para a cana-de-açúcar é desafiadora devido à natureza semiperene da cultura, onde o preparo do solo é necessário apenas a cada cinco ou mais anos, além da intensa mecanização utilizada na produção, o que pode comprometer a persistência das alterações estruturais decorrentes do manejo conservacionista (De Oliveira et al., 2022; Souza et al., 2022).

O PL, por sua vez, constitui alternativa conservacionista de operacionalização mais simples, na qual a mobilização do solo é restrita à linha de plantio, preservando-se a estrutura das entrelinhas (Melo et al., 2019). Ao avaliar ambos os sistemas em cana-de-açúcar, De Oliveira et al. (2022) verificaram que o plantio direto preservou os atributos físicos do solo e elevou o teor de carbono orgânico, enquanto o preparo mínimo promoveu incremento no estoque de carbono do solo, evidenciando que os dois manejos conservacionistas atuam sobre a dinâmica do carbono por vias distintas.

O carbono orgânico do solo (COS) não constitui um compartimento homogêneo, sendo comumente subdividido, por meio do fracionamento físico granulométrico, em frações com distintos graus de proteção e tempo de

permanência (Cambardella; Elliott, 1992). O carbono orgânico particulado (COP) possui estruturas celulares ainda reconhecíveis, e é protegido fisicamente pelos agregados (Loss et al., 2009). O carbono orgânico associado aos minerais (COAM), por sua vez, interage com os minerais e está protegida na forma coloidal (Loss et al., 2009). O fracionamento do COS permite, portanto, distinguir o carbono lábil, indicativo de mudanças recentes no manejo, do carbono estabilizado, associado à capacidade de estocagem de longo prazo, informação essencial tanto para a avaliação da qualidade do solo quanto para a estimativa do potencial de sequestro de carbono em sistemas canavieiros.

Partiu-se da hipótese de que ambos os sistemas conservacionistas alteram a distribuição vertical das frações de carbono e a densidade ao longo do perfil, com padrões distintos de estratificação em função da forma e intensidade de mobilização do solo característicos de cada manejo.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar e comparar o impacto dos sistemas de plantio direto e preparo localizado sobre o carbono orgânico do solo (COS), a fração particulada (COP) e associada aos minerais (COAM), e a densidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura conservacionista

A agricultura conservacionista pode ser definida como um sistema de manejo que busca mitigar alterações na estrutura, composição e diversidade biológica do solo, assim todas as formas de se praticar agricultura conservacionista compartilham três preceitos fundamentais, redução ou supressão de mobilização de solo; manutenção de resíduos culturais na superfície do solo; e diversificação de espécies, em rotação, consorciação e/ou sucessão de culturas (Denardin et al., 2012).

O PD proporciona maior quantidade de material orgânico ao solo. Segundo Blanco-Canqui e Ruis (2018), o sistema induz aumentos no teor de carbono orgânico do solo próximo à superfície. Além disso, os teores de carbono orgânico apresentam alta correlação com a densidade do solo (Mota et al., 2014).

Embora tenha sido introduzido no final da década de 1960, somente a partir dos anos 1990 é que se iniciou uma promoção ativa para a adoção do PD (Dos Santos Fernandes et al., 2019). A adoção desse sistema conservacionista para a cana-de-açúcar se consolidou principalmente a partir da transição da colheita manual, para a colheita mecanizada da cana crua. Na colheita manual havia a queima da palhada, que apesar de facilitar o corte da cana para o trabalhador, causava problemas respiratórios e de poluição do ar devido a emissão de dióxido de carbono, óxido nitroso e metano, além de diminuir o aporte de matéria orgânica no solo (Borges et al, 2020).

Essa transição foi impulsionada pela Lei n. 11.241 de 2002, que decretou a eliminação gradativa da queima da palhada (ALSP, 2002). A assinatura do Protocolo Agroambiental de 2007 também impulsionou essa transição, com intuitos de promover e fortalecer a produção sustentável, com foco na antecipação da eliminação do uso do fogo nos canaviais, na proteção das matas ciliares, na recuperação de nascentes e na adoção de outras práticas conservacionistas (IEA, 2014).

Atualmente ela está cada vez mais consolidada no país inteiro, com 92,4% de utilização, regiões como a Norte do país já possui, desde a safra 2016/2017, 100% da colheita mecanizada, enquanto a maior região produtora, a Centro-Sul, 98,6% da colheita é mecanizada (CONAB, 2026).

2.2A reforma do canavial e a rotação de culturas

Após o plantio, o canavial permite de três a seis colheitas consecutivas, dependendo da variedade, do manejo do solo e da água e das condições climáticas. Com o declínio progressivo da produtividade ao longo dos cortes, o

canavial atinge o final do ciclo e passa pelo processo de renovação, denominado reforma. Nesse momento, o produtor pode optar pela reimplantação imediata da cultura ou pela rotação com outras espécies, decisão que depende do objetivo de melhorar as condições físico-químicas do solo ou de gerar renda no período.

Historicamente, a reforma era conduzida sob preparo convencional, caracterizado pelo revolvimento em área total. Barbosa et al. (2019), avaliando práticas de preparo durante o plantio de cana-de-açúcar no Centro-Sul do Brasil, verificaram que o preparo convencional reduziu a compactação apenas no ciclo de cana-planta e que, após quatro anos, as condições físicas do solo tornaram-se semelhantes entre os sistemas de preparo, sem diferenças de produtividade. Além disso, o revolvimento intenso promove a desagregação do solo e acelera a oxidação da matéria orgânica, comprometendo a resiliência do sistema em solos tropicais (Conte et al., 2013; Cherubin et al., 2016).

A introdução de culturas em rotação durante a reforma constitui alternativa consolidada a esse cenário. Entre as leguminosas comumente empregadas destacam-se a *Crotalaria juncea*, a soja e o amendoim, cujos benefícios diretos incluem a fixação biológica de nitrogênio, a incorporação de matéria orgânica e a conservação do solo. Avaliando o cultivo prévio de leguminosas em área de reforma de canavial, Ambrosano et al. (2011) verificaram efeitos positivos sobre a produtividade e a lucratividade da cana-de-açúcar. Além dos ganhos agronômicos, a rotação com leguminosas eleva a renda líquida do produtor em relação à ausência de pré-cultivo, o que tem incentivado sua adoção crescente nas áreas de reforma do canavial. As espécies, contudo, apresentam desempenhos distintos: Ambrosano et al. (2011) verificaram que a crotalária

júncea proporcionou o melhor desempenho agronômico e econômico após cinco cortes, enquanto o amendoim, apesar do elevado custo de produção e da renda líquida equivalente à da testemunha, destacou-se como a leguminosa mais eficiente na redução da infestação de *Pratylenchus* spp. Assim, a escolha da cultura de rotação depende do objetivo predominante — geração de renda, aporte de nitrogênio ou controle fitossanitário.

A combinação entre rotação de culturas e supressão do revolvimento durante a reforma alinha-se aos preceitos da agricultura conservacionista descritos por Denardin et al. (2012), configurando o contexto no qual se inserem o plantio direto e o preparo localizado.

2.3 Sistemas de Preparo

Os sistemas de preparo do solo diferenciam-se, essencialmente, pela intensidade e pela abrangência da mobilização mecânica. No preparo convencional, a mobilização ocorre em área total, no preparo localizado (PL), restringe-se à linha de plantio, e no plantio direto (PD), limita-se à mobilização mínima do sulco de plantio (Barbosa et al., 2019; Melo et al., 2019). Essa gradação define não apenas o grau de perturbação estrutural imposto ao solo, mas também a distribuição do aporte de resíduos ao longo do perfil, condicionando os atributos físicos e o comportamento das frações de carbono.

Ao comparar esses sistemas em canaviais do Centro-Sul, Barbosa et al. (2019) concluíram que o plantio direto pode constituir alvo de manejo para a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar, uma vez que as condições físicas do solo se equipararam entre os preparos ao longo do tempo, sem prejuízo à produtividade.

O uso intensivo de maquinário nas diferentes operações da cultura pode acarretar compactação do solo. Carvalho et al. (2011), avaliando preparos convencionais, subsolagem e plantio direto em Latossolo Vermelho distrófico cultivado com cana-de-açúcar em área anteriormente ocupada por soja, verificaram diferenças significativas de densidade do solo e de porosidade total na camada de 0,21–0,40 m, sem, contudo, registrar diferenças de produtividade entre os sistemas. Considerando os custos de implantação, o plantio direto apresentou a maior viabilidade econômica.

O PL é amplamente utilizado nas plantações de cana-de-açúcar no Brasil devido à sua operacionalização relativamente mais fácil. Assim como o PD, o PL proporciona menor alteração da estrutura do solo e cria condições físicas adequadas para o cultivo da cana (Souza et al., 2022).

No PL, ao invés de preparar a área por completo, ocorre a subsolagem, antes do plantio da cana-de-açúcar, para atenuar os efeitos da compactação, somente na linha em que o sulcador passará durante o plantio da cana-de-açúcar (Marasca, 2014), caracterizando assim o manejo conservacionista do solo.

2.4 Indicadores de qualidade do solo

A qualidade do solo pode ser definida como sua capacidade de funcionar dentro dos limites de um ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a saúde vegetal e animal (Doran; Parkin, 1994). Por se tratar de um conceito multifuncional, sua avaliação não pode se apoiar em uma única medida, sendo realizada por meio de indicadores,

atributos físicos, químicos e biológicos sensíveis às alterações de manejo e capazes de refletir as funções do solo.

Um indicador adequado deve ser sensível às mudanças de manejo, apresentar metodologia de determinação acessível e possuir relação direta com processos do ecossistema, como a ciclagem de carbono e nitrogênio (Doran; Parkin, 1994). Entre os indicadores físicos destacam-se a densidade do solo, a porosidade, a estabilidade de agregados e a resistência à penetração; entre os químicos, o pH, a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes; e entre os biológicos, o carbono da biomassa microbiana e a respiração basal.

Em áreas de cana-de-açúcar, Cherubin et al. (2016) demonstraram que índices de qualidade do solo permitem discriminar sistemas de manejo e detectar processos de degradação associados à expansão da cultura. Nesse conjunto, o carbono orgânico do solo ocupa posição central, por integrar simultaneamente as dimensões física, química e biológica: influencia a agregação e a densidade, contribui para a capacidade de troca catiônica e constitui a fonte energética da atividade microbiana (Reeves, 1997). Por essa razão, a densidade do solo e o carbono orgânico, atributos avaliados no presente trabalho, figuram entre os indicadores mais utilizados na avaliação de sistemas conservacionistas.

2.5 Densidade do solo e densidade de partículas

A densidade do solo (D_s) é definida como a relação entre a massa de solo seco e o volume total ocupado por essa massa, incluindo o volume de sólidos e o de poros (Teixeira et al., 2017). Expressa em g cm^{-3} , constitui atributo físico de determinação simples e amplamente empregado como indicador do estado de

compactação, uma vez que o adensamento reduz o volume ocupado sem alterar a massa de sólidos, elevando o valor de D_s (Conte et al., 2013).

Distinta da D_s , a densidade de partículas (D_p) refere-se à relação entre a massa de solo seco e o volume ocupado exclusivamente pelas partículas sólidas (Teixeira et al., 2017). Por depender apenas da composição mineralógica, apresenta pouca variação entre solos minerais, situando-se em torno de 2,65 g cm⁻³, valor próximo ao do quartzo, mineral predominante na fração areia. A distinção entre ambas é essencial: enquanto a D_p é praticamente invariável frente ao manejo, a D_s responde diretamente às operações mecanizadas, o que a torna indicador sensível de alterações estruturais.

A D_s relaciona-se ao teor de carbono orgânico do solo (Mota et al., 2014). Esse comportamento decorre de dois mecanismos complementares. O primeiro, de natureza direta, é o fato de a matéria orgânica apresentar densidade inferior à da fração mineral, de modo que seu acúmulo reduz a massa por unidade de volume. O segundo, de natureza estrutural, é a atuação da matéria orgânica como agente cimentante na formação e na estabilização de agregados, promovendo estrutura mais bem organizada (Six et al., 2002).

Nos sistemas conservacionistas, em que a mobilização é reduzida ou suprimida, a estrutura do solo é preservada, favorecendo a atividade biológica e o acúmulo de matéria orgânica (Blanco-Canqui; Ruis, 2018). Esses processos tornam o carbono orgânico indicador fundamental para determinar padrões de qualidade e avaliar a sustentabilidade dos sistemas de produção (Reeves, 1997). Cabe ressaltar, contudo, que valores mais elevados de D_s não implicam

necessariamente restrição ao desenvolvimento radicular, sendo os limites críticos dependentes da textura do solo (Barbosa et al., 2018).

2.6 Matéria orgânica e as frações de carbono

A matéria orgânica do solo (MOS) compreende o conjunto de compostos orgânicos presentes no solo, incluindo resíduos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição, a biomassa microbiana viva e, sobretudo, os produtos resultantes da síntese microbiana, compostos gerados pelo metabolismo dos microrganismos a partir dos resíduos originais (Nanzer et al., 2019; Cotrufo et al., 2013). Assim, a MOS não é apenas o resíduo remanescente da decomposição, mas o produto de um processo simultâneo de degradação e de síntese de novos compostos orgânicos.

A MOS confere ao solo maior agregação, menor densidade, maior capacidade de troca catiônica, maior resistência às variações de pH e redução das perdas de nutrientes por lixiviação, sendo reconhecida como indicador-chave da qualidade do solo, sensível aos sistemas de manejo (Conceição et al., 2005; Nanzer et al., 2019). Como aproximadamente 58% da MOS é constituída por carbono orgânico (CO), a quantificação do carbono no solo tornou-se um dos principais indicadores de qualidade.

O CO, todavia, não constitui compartimento homogêneo. O fracionamento físico granulométrico, proposto por Cambardella e Elliott (1992), permite separá-lo em duas frações operacionalmente definidas pelo diâmetro das partículas às quais se associa. O carbono orgânico particulado (COP) corresponde à porção associada às partículas com diâmetro superior a 53 micrômetros, consistindo em

partículas derivadas de resíduos de plantas e hifas, com estruturas celulares reconhecíveis, cuja permanência no solo é condicionada pela proteção física proporcionada pelos agregados (Loss et al., 2009). O carbono orgânico associado aos minerais (COAM), por sua vez, refere-se à fração ligada às partículas com diâmetro inferior a 53 micrômetros, que interage com a superfície das partículas minerais formando complexos organominerais, sendo protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (Loss et al., 2009; Six et al., 2002).

A análise separada dessas frações justifica-se porque o teor total de carbono, isoladamente, mascara informações relevantes. Duas áreas podem apresentar o mesmo teor de CO e, ainda assim, diferir substancialmente quanto à estabilidade desse carbono e à sua permanência no perfil. O COP, por apresentar ciclagem rápida e depender da proteção física conferida pelos agregados, é mais vulnerável a distúrbios e responde de forma precoce às alterações de manejo, funcionando como indicador sensível de mudanças recentes (Cambardella; Elliott, 1992; Cotrufo et al., 2019).

O COAM, por ser estabilizado física e quimicamente pela fração mineral, apresenta tempo de residência substancialmente maior e representa o carbono efetivamente estocado no longo prazo, ainda que apresente comportamento de saturação, ou seja, um limite superior de acúmulo (Cotrufo et al., 2019; Lavallee et al., 2020). Dessa forma, o fracionamento permite distinguir o carbono lábil, indicativo de tendência, do carbono estabilizado, indicativo de estoque, informação que o teor total não é capaz de fornecer e que é determinante para avaliar se um sistema de manejo está de fato acumulando carbono de maneira duradoura.

2.7 Dinâmica do carbono no solo e perspectivas de estocagem

O carbono no solo encontra-se em constante fluxo, resultante do balanço entre a entrada de resíduos vegetais e radiculares e a saída por mineralização microbiana. A compreensão contemporânea desse processo foi reformulada pelo modelo MEMS (Microbial Efficiency-Matrix Stabilization), proposto por Cotrufo et al. (2013), segundo o qual os constituintes vegetais mais lábeis, por serem utilizados com maior eficiência pelos microrganismos, constituem a principal fonte de produtos microbianos e, conseqüentemente, os principais precursores da matéria orgânica estável, que se estabiliza por meio da agregação e da ligação química à matriz mineral do solo.

Esse modelo estabelece uma conexão direta entre as duas frações. O COP não representa apenas carbono lábil à espera de mineralização, ele constitui a matéria-prima a partir da qual, via processamento microbiano, forma-se a necromassa que dará origem ao COAM (Cotrufo et al., 2013). Assim, sistemas que mantêm aporte contínuo de resíduos alimentam o COP, o qual, sob condições que favoreçam a eficiência microbiana e limitem a perturbação física, é progressivamente convertido em carbono estabilizado.

O manejo do solo intervém diretamente nessa dinâmica, atuando sobre a proteção física conferida pelos agregados. O revolvimento rompe os agregados e expõe ao ataque microbiano o carbono previamente protegido em seu interior, ao passo que a supressão da mobilização preserva essa proteção e favorece a permanência do carbono no perfil (Six et al., 2002; Blanco-Canqui; Ruis, 2018). Lima et al. (2016), avaliando o fracionamento granulométrico da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto, preparo reduzido e preparo

convencional, verificaram os maiores teores de COAM sob plantio direto, seguido do preparo reduzido e, por fim, do preparo convencional, atribuindo esse padrão à menor perturbação estrutural e à consequente estabilização do carbono na fração mineral.

O aporte de resíduos, por sua vez, mostra-se determinante. Tang et al. (2024), avaliando sistemas de preparo com e sem retorno de resíduos, observaram que os teores de carbono orgânico e de carbono lábil foram significativamente superiores nos tratamentos com incorporação de resíduos em relação ao controle sem resíduos, e que a mineralização acumulada do carbono se correlacionou positivamente com o teor de carbono orgânico e negativamente com a densidade do solo. Essa correlação negativa entre mineralização e densidade reforça a interdependência entre os atributos físicos e a dinâmica do carbono, justificando sua avaliação conjunta.

Essa distinção adquire relevância econômica crescente. Como o COAM apresenta tempo de residência substancialmente superior ao do COP, é essa fração que efetivamente representa o carbono estocado de forma duradoura e, portanto, a que possui significado para fins de contabilização de sequestro de carbono. Com a instituição do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões pela Lei n. 15.042/2024 e a consolidação do mercado voluntário, práticas de manejo capazes de incrementar o carbono estabilizado no solo passam a ter potencial de valoração econômica (Brasil, 2024). Nesse contexto, sistemas conservacionistas de manejo em cana-de-açúcar apresentam potencial de mitigação de emissões, sobretudo pela manutenção da palhada e pela redução do revolvimento (Bordonal et al., 2018). Um sistema que eleve o carbono total à

custa exclusivamente do COP produz ganho transitório, já o incremento do COAM sinaliza estocagem efetiva. Compreender como o plantio direto e o preparo localizado afetam essas frações e sua relação com a densidade do solo é, portanto, essencial não apenas para avaliar a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas de produção de cana-de-açúcar, mas também para dimensionar seu potencial como sumidouros de carbono.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área comercial de produção de cana-de-açúcar localizada no município de Araraquara, estado de São Paulo (21°47'40" S; 48°10'32" W; altitude média de 664 m). Segundo a classificação climática de Köppen (Köppen; Geiger, 1928), o clima da região é do tipo Cwa, caracterizado por inverno seco e verão quente, com temperatura média do mês mais quente de 22,8 °C, temperatura média do mês mais frio de 16,8 °C e precipitação média anual de 1.352 mm.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura média (Santos et al., 2018), apresentando 720 g kg⁻¹ de areia, 260 g kg⁻¹ de argila e 20 g kg⁻¹ de silte na camada de 0 a 0,20 m de profundidade, conforme análise granulométrica realizada de acordo com Teixeira et al. (2017).

O grupamento textural médio compreende solos com teor de argila inferior a 35% e teor de areia superior a 15%, excetuadas as classes texturais areia e areia franca (Santos et al., 2018), condição atendida pelo solo em questão, que ocupa posição intermediária entre solos arenosos e argilosos. Essa característica é relevante para os atributos avaliados: o elevado teor de areia implica menor superfície específica da fração mineral e, conseqüentemente, menor capacidade intrínseca de estabilização do carbono na fração associada aos minerais, além de limitar a proteção física conferida pelos agregados.

A área é destinada à produção de cana-de-açúcar há mais de 20 anos, com colheita de cana crua mecanizada desde 2005.

A avaliação teve início após a reforma do canavial, etapa em que o canavial, ao final do ciclo produtivo, é renovado. Após o arranquio da soqueira da cana anterior, a área foi submetida à rotação com soja, cultivada de novembro de 2022 a março de 2023 — prática que promove a fixação biológica de nitrogênio, o aporte de matéria orgânica e a conservação do solo durante o período de renovação (Ambrosano et al., 2011). Após a colheita da soja, foram implantados os dois sistemas de manejo do solo avaliados: plantio direto (PD) e preparo localizado (PL).

O preparo localizado (PL) consistiu na operação de subsolagem realizada no sentido das linhas de plantio, com equipamento dotado de pares de hastes espaçados em 1,50 m, que promoveram a mobilização de uma faixa de 0,80 m de largura à profundidade média de trabalho de 0,40 m. Dessa forma, a mobilização restringiu-se à linha de plantio, mantendo-se preservada a estrutura das entrelinhas. O plantio direto (PD), por sua vez, foi caracterizado pela

ausência da operação de subsolagem, limitando-se a mobilização do solo ao sulco de plantio.

A aplicação de corretivos em ambas as áreas foi realizada para elevar a saturação por bases a 70%, e a adubação de plantio foi feita de acordo com os resultados da análise química do solo.

Em abril de 2023, foi realizado o plantio da cana-de-açúcar variedade CTC 2994 no sistema mecanizado, com espaçamento entre linhas de 1,5 m. Todas as operações agrícolas durante o ciclo produtivo da cana-de-açúcar foram realizadas nas linhas de cultivo, conforme recomendações fitotécnicas específicas.

A área de plantio abrange 21.000 m² (2,1 ha), sendo 10.500 m² para cada sistema de manejo. Cada sistema de manejo foi constituído por 100 linhas de cana-de-açúcar espaçadas em 1,5 m entre linhas, com 70 m de comprimento. A área útil de cada sistema de manejo foi representada por 80 linhas de cana-de-açúcar com 50 m de comprimento, totalizando 6.000 m². Portanto, a bordadura foi composta por 10 m no início e 10 m no final da linha de cana-de-açúcar, além de 10 linhas de cana-de-açúcar na parte superior e 10 linhas na parte inferior da área destinada ao sistema de manejo em questão.

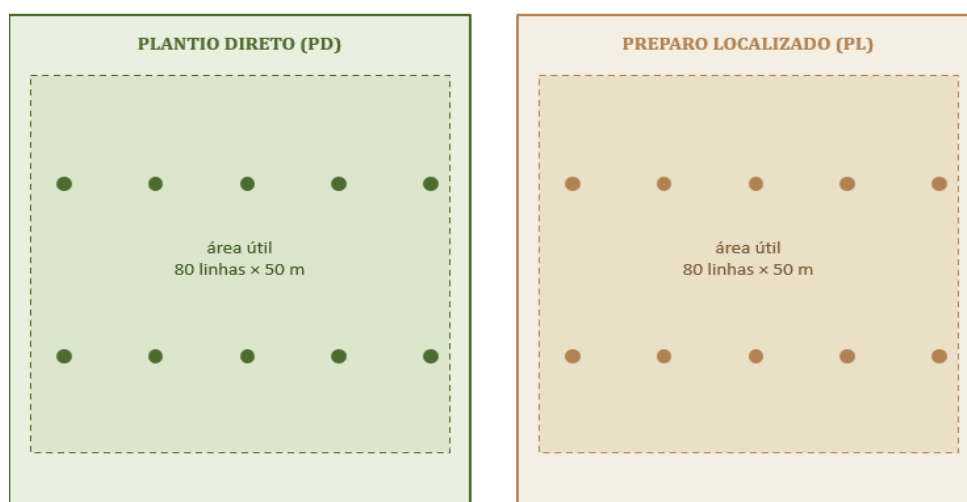


Figura 1. Representação esquemática do delineamento experimental e do esquema de amostragem nos sistemas de plantio direto (PD) e preparo localizado (PL), em Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

A amostragem do solo foi realizada em dezembro de 2023, na fase de pleno desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar. As amostras analisadas foram obtidas na área útil de cada um dos dois sistemas de manejo, com a amostragem de 10 pontos em duas camadas, de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m de profundidade. Portanto, foram avaliadas 40 amostras deformadas e 40 amostras indeformadas de solo.

Para a coleta das amostras deformadas, foi utilizado um trado do tipo holandês. Para as amostras indeformadas, utilizou-se um amostrador do tipo Uhland, juntamente com anéis volumétricos com dimensões de 0,05 x 0,05 m. As amostras deformadas foram utilizadas para determinação do carbono orgânico do solo e seu fracionamento físico; as amostras indeformadas, por sua vez, foram destinadas à obtenção da densidade do solo.

Para a determinação do carbono orgânico do solo (CO) e fracionamento físico do carbono orgânico do solo, foi adotado o método proposto por Cambardella e Elliott (1992). Para o CO, 1 cm³ de solo foi transferido para um

copo descartável de 80 mL, seguido por 10 mL de solução de dicromato de sódio com ácido sulfúrico: $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ($0,667 \text{ mol L}^{-1}$) + H_2SO_4 (5 mol L^{-1}). A mistura foi colocada em mesa agitadora orbital (180 rpm) por 10 minutos e, após a agitação, ficou em repouso por uma hora.



Figura 2. Mesa agitadora orbital
Fonte: o autor (2026).

Após esse intervalo, foi adicionado 50 mL de água deionizada e a solução ficou em repouso durante a noite antes de proceder a leitura em uma alíquota através de espectrofotômetro UV-visível (650 nm).



Figura 3. Espectrofotômetro UV-visível
Fonte: o autor (2026).

Para o fracionamento físico do carbono, carbono orgânico particulado (COP), pesou-se 20 g da amostra de solo, adicionou-se 60 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), em um erlenmeyer (250 mL), e foi agitado por 15 horas em mesa agitadora pendular (150 rpm).



Figura 4. Mesa agitadora pendular
Fonte: o autor (2026).

A suspensão pós-agitação foi transferida para uma peneira de malha 53 μm e o material retido foi pesado, após secagem em estufa (50°C), para quantificar a porcentagem de material particulado (COP). Em seguida, a amostra seca foi macerada para obtenção de amostra de material particulado homogêneo e a leitura foi realizada conforme descrito anteriormente.



Figura 5. Maceração manual
Fonte: o autor (2026).

Por fim, para determinação do carbono orgânico associado aos minerais (COAM), foi realizada a subtração da quantidade de COP da quantidade de CO.

A densidade do solo (D_s) foi obtida de acordo com Teixeira et al. (2017), sendo calculada pela razão entre a massa de solo seco e o volume do anel volumétrico, conforme a Equação 1:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

em que: D_s = densidade do solo (g cm^{-3}); M_s = massa de solo seco em estufa a 105°C até massa constante (g); V_t = volume total do anel volumétrico (cm^3), obtido a partir de suas dimensões de $0,05 \times 0,05 \text{ m}$.

A avaliação foi conduzida em uma área comerciais de produção, do Grupo São Martinho, nas quais cada sistema de manejo ocupa uma gleba contínua, não havendo repetição das unidades de manejo como tratamentos independentes casualizados no espaço. Por essa razão, e em conformidade com a natureza observacional do estudo, para analisar os valores dos atributos do solo, foi utilizada a estatística descritiva para cada camada de solo, a fim de caracterizar os tratamentos (PD e PL) e obter a média e o erro padrão dos atributos CO, COP, COAM e D_s . Todas essas análises foram realizadas com o auxílio do software Agroestat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de carbono orgânico do solo (COS) variaram entre os sistemas de manejo e as camadas analisadas. Com base na estatística descritiva (média e erro padrão), na camada superficial (0–0,10 m) o PL apresentou maiores teor médio de 13,13 g kg⁻¹ de COS, cerca de 2,7 vezes os observados no PD com 4,90 g kg⁻¹. Já na camada subsuperficial (0,10–0,20 m) o cenário se inverteu, com o PD registrando valor médio de 12,51 g kg⁻¹, cerca de 19,1% superiores aos do PL com 10,50 g kg⁻¹ (Figura 6). Esse contraste indica que os dois manejos conservacionistas afetam não apenas a quantidade de carbono armazenada, mas sobretudo sua distribuição ao longo do perfil, em função da forma e da intensidade de mobilização do solo característico de cada sistema.

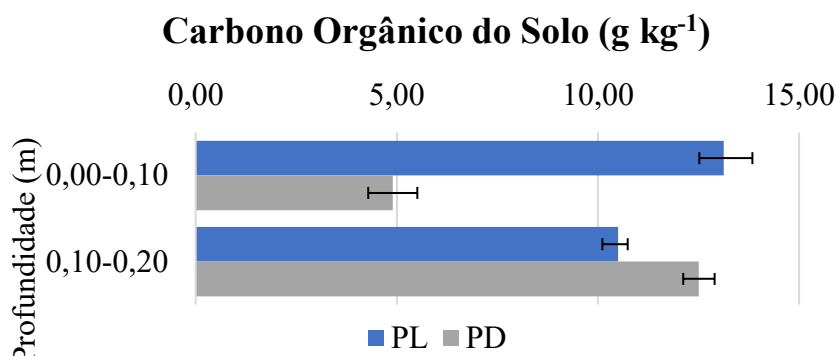


Figura 6. Valores de Carbono Orgânico do solo do Latossolo Vermelho com plantio direto (PD) e preparo localizado (PL) em função de duas profundidades (0-0,10m e 0,10m-0,20m) na cana-de-açúcar.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

O carbono orgânico particulado (COP), fração lábil, composta predominantemente por resíduos vegetais parcialmente decompostos e de ciclagem relativamente rápida (Lavallee et al., 2020), apresentou teores médios semelhantes entre PD e PL nas duas profundidades: 2,92 e 2,82 g kg⁻¹ na camada de 0–0,10 m, e 1,66 e 1,68 g kg⁻¹ na camada de 0,10–0,20 m, respectivamente (Figura 7).

Essa ausência de diferenciação é coerente com a natureza dos tratamentos avaliados, já que o COP responde primariamente ao aporte de resíduos, e não ao grau de mobilização do solo. Como ambos os sistemas são conservacionistas e mantêm aporte de resíduos comparável, não se observaram diferenças marcantes nessa fração, ainda que ela seja reconhecidamente sensível ao manejo (Conceição et al., 2005). Essa interpretação é corroborada por Pimentel et al. (2024), que, avaliando taxas de remoção de palhada em Latossolo sob cana-de-açúcar, verificaram que a remoção baixa elevou o COP em 46,2% e o COAM em apenas 12,4% na camada superficial, em relação à

remoção total, evidenciando que o COP é a fração mais responsiva ao aporte de palhada.

A isso soma-se a textura do solo: com 720 g kg⁻¹ de areia, o Latossolo avaliado oferece proteção física limitada, uma vez que a formação de agregados estáveis, responsável por resguardar o COP da mineralização, depende da fração mineral fina. Nessas condições, o COP tende a ser rapidamente processado, independentemente do sistema de preparo, o que reduz a possibilidade de acúmulo diferencial.

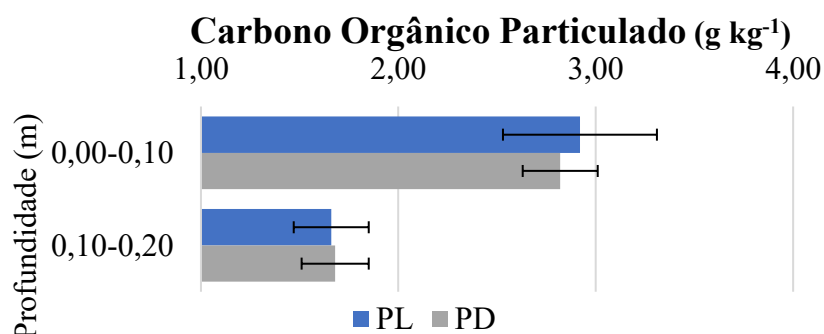


Figura 7. Valores de Carbono Orgânico Particulado do Latossolo Vermelho com plantio direto (PD) e preparo localizado (PL) em função de duas profundidades (0-0,10m e 0,10m-0,20m) na cana-de-açúcar.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

O carbono orgânico associado aos minerais (COAM) seguiu tendência semelhante à do COS: maiores teores médios na superfície sob PL com 10,21 g kg⁻¹, contra 2,89 g kg⁻¹ no PD, e enriquecimento na camada mais profunda sob PD 10,84 g kg⁻¹, contra 8,45 g kg⁻¹ no PL (Figura 8). Trata-se da fração estabilizada por associação organomineral, formada em grande parte pelo processamento microbiano dos resíduos (necromassa) e com maior tempo de permanência no solo (Cotrufo et al., 2019; Lavalley et al., 2020).

O acúmulo dessa fração na subsuperfície sob PD evidencia o potencial desse manejo de estabilizar carbono a longo prazo, favorecido pela ausência de revolvimento e pela proteção via associações organominerais (Six et al., 2002). Comportamento semelhante foi relatado por Lima et al. (2016), que, avaliando o fracionamento granulométrico da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto, preparo reduzido e preparo convencional, verificaram os maiores teores de COAM sob plantio direto, seguido do preparo reduzido e, por fim, do preparo convencional, atribuindo esse padrão à menor perturbação estrutural e à consequente estabilização do carbono na fração mineral.

Já o maior teor superficial sob PL pode estar associado à mobilização localizada da subsolagem, que rompe camadas adensadas e incorpora resíduos e corretivos na linha de plantio, criando ambiente favorável ao aporte e à estabilização de carbono nessa região. Cabe ressaltar, contudo, que o Latossolo avaliado apresenta textura média, com elevado teor de areia, o que implica menor superfície específica da fração mineral e, portanto, capacidade intrínseca reduzida de estabilização de carbono na forma associada aos minerais, condição que limita o potencial de acúmulo dessa fração em ambos os sistemas.

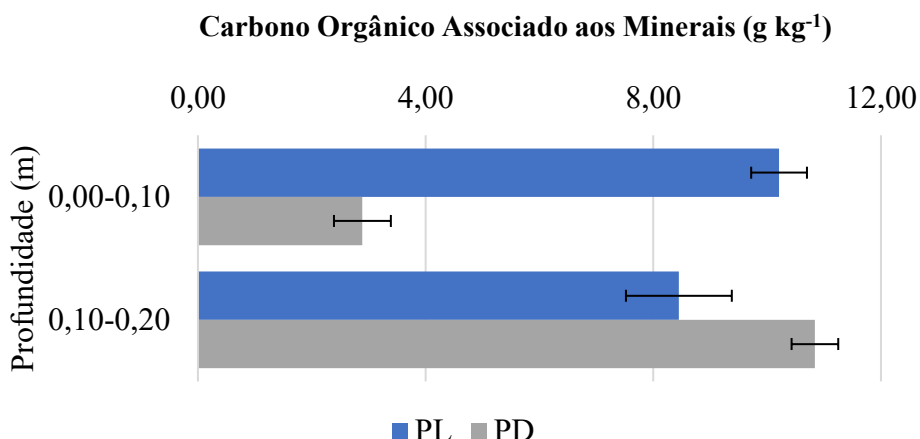


Figura 8. Valores de Carbono Orgânico Associado aos Minerais do Latossolo Vermelho cultivado com plantio direto (PD) e preparo localizado (PL) em função de duas profundidades (0-0,10m e 0,10m-0,20m) na cana-de-açúcar.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Quanto à densidade do solo (D_s), os valores médios foram semelhantes entre PD e PL na camada de 0–0,10 m (1,67 e 1,61 g cm⁻³, respectivamente). Na profundidade de 0,10–0,20 m, o PD apresentou valor médio de 1,84 g cm⁻³, cerca de 5,7% superiores aos do PL com 1,74 g cm⁻³ (Figura 9), o que pode estar associado à ausência de mobilização mecânica nesse sistema. Ainda assim, os valores não indicam impedimento ao crescimento radicular, em concordância com De Oliveira et al. (2022), que verificaram maior desenvolvimento radicular sob PD mesmo com densidades ligeiramente superiores; menores valores de densidade sob subsolagem também foram relatados por Calfa et al. (2018). Cabe destacar, porém, que as alterações estruturais produzidas pela subsolagem tendem a ser temporárias em cana-de-açúcar (Souza et al., 2022), de modo que o PL não promove melhoria estrutural duradoura. A manutenção da qualidade física sob manejos conservacionistas, com pequenas variações de densidade

que não comprometem o funcionamento do solo, também é relatada em cana por Castioni et al. (2019) e Tenelli et al. (2019).

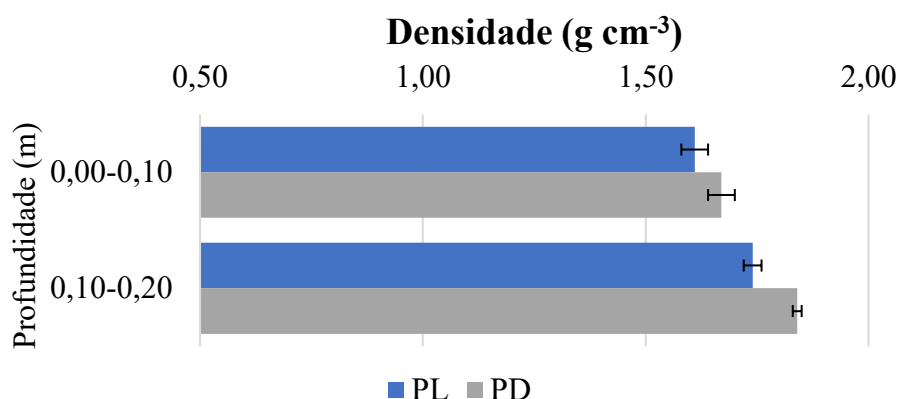


Figura 9. Valores de densidade do solo de Latossolo Vermelho cultivado com plantio direto (PD) e preparo localizado (PL) em função de duas profundidades (0-0,10m e 0,10m-0,20m) na cana-de-açúcar.

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Ao analisar os parâmetros avaliados, verifica-se que a densidade do solo e as frações de carbono estão intimamente relacionadas, compondo uma dinâmica de equilíbrio entre estabilidade estrutural e acúmulo de matéria orgânica. Essa relação decorre da própria definição da densidade, que expressa a razão entre a massa de solo seco e o volume total ocupado. A matéria orgânica atua sobre os dois termos dessa razão: por apresentar densidade inferior à da fração mineral, reduz a massa por unidade de volume, e, sobretudo, por funcionar como agente cimentante na formação de agregados, promove estrutura mais bem organizada e maior volume de poros (Six et al., 2002). Tang et al. (2024) verificaram correlação negativa entre a mineralização acumulada de carbono e a densidade do solo, o que reforça a interdependência entre os atributos físicos e a dinâmica do carbono e justifica sua avaliação conjunta.

O PD, ao preservar a estrutura do solo, favorece a formação de agregados estáveis e o acúmulo gradual de carbono nas formas mais estáveis, como o carbono orgânico associado aos minerais (COAM), mesmo apresentando discreto aumento na densidade.

Por outro lado, o preparo localizado (PL), ao promover revolvimento restrito do solo, intensifica a mineralização da matéria orgânica e o aporte imediato de carbono orgânico do solo (COS), o que justifica os maiores teores observados na camada superficial. O carbono orgânico particulado (COP), por sua vez, desempenha papel intermediário entre essas duas dinâmicas, representando a fase transitória entre as formas mais estáveis de carbono.

Essas evidências demonstram que a escolha do sistema de manejo influencia não apenas o quantitativo de carbono no solo, mas também sua distribuição vertical e o equilíbrio físico-químico entre acúmulo, decomposição e estabilização da matéria orgânica, determinando, assim, a qualidade do ambiente edáfico.

Assim, esses resultados evidenciam que PD e PL são complementares em termos de dinâmica do carbono no solo: o PL atua de forma mais expressiva sobre o aporte e a renovação superficial do carbono, enquanto o PD favorece a estabilização das frações mais recalcitrantes ao longo do perfil. Essa complementaridade reforça que a escolha do sistema de manejo em canaviais deve considerar não apenas indicadores de produtividade imediata, mas também os objetivos de sustentabilidade de longo prazo, incluindo o sequestro de carbono e a manutenção da qualidade física do solo.

Os resultados demonstram que os sistemas conservacionistas avaliados influenciaram principalmente a distribuição vertical do carbono no perfil do solo. Enquanto o preparo localizado favoreceu maiores teores de COS e COAM na camada superficial, o plantio direto promoveu maior acúmulo dessas frações na camada subsuperficial. Esse comportamento evidencia diferenças na dinâmica de incorporação, decomposição e estabilização do carbono entre os manejos, mesmo quando ambos são considerados conservacionistas.

Cabe destacar que a camada superficial (0–0,10 m) concentrou as maiores divergências entre os manejos, tanto para o COS (13,13 g kg⁻¹ no PL contra 4,90 g kg⁻¹ no PD) quanto para o COAM (10,21 e 2,89 g kg⁻¹, respectivamente). Trata-se da camada mais diretamente afetada pelas operações de implantação: no PL, a subsolagem promove o rompimento das camadas adensadas e a incorporação de resíduos e corretivos na linha de plantio. No PD, ausente essa mobilização, o sistema radicular tende a explorar de forma mais intensa o perfil, o que amplia a rizodeposição em profundidade. De Oliveira et al. (2022) verificaram, em cana-de-açúcar, maior biomassa seca de raízes na camada de 0–0,20 m sob plantio direto em comparação aos demais preparos, com relação linear positiva entre biomassa radicular e produtividade. Esse padrão é coerente com o enriquecimento subsuperficial de COS e COAM observado no PD no presente trabalho, sugerindo que a contribuição radicular constitui via preferencial de aporte de carbono nesse sistema.

5. CONCLUSÃO

O preparo localizado proporcionou os maiores teores de carbono orgânico do solo e de carbono orgânico associado aos minerais na camada de 0–0,10 m, enquanto o plantio direto favoreceu o acúmulo dessas frações na camada de 0,10–0,20 m. O carbono orgânico particulado apresentou teores semelhantes entre os sistemas em ambas as camadas, comportamento atribuível ao aporte comparável de resíduos. A densidade do solo foi próxima entre os manejos na superfície e discretamente superior sob plantio direto em profundidade, sem que os valores observados indicassem impedimento ao desenvolvimento radicular.

Confirma-se, portanto, a hipótese de que ambos os sistemas alteram a distribuição vertical das frações de carbono e a densidade ao longo do perfil, com padrões distintos de estratificação em função da intensidade de mobilização característica de cada manejo.

6. REFERÊNCIAS

ALSP. **Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas.** 2002. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11241-19.09.2002.html>. Acesso em: 26 mar 2026.

AMBROSANO, E. J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; AZCÓN, R. **Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas.** *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. 2015. **Experimentação agrônômica & Agroestat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos.** Jaboticabal: Multipress, 2015. 396p.

BARBOSA, L. C.; DE SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. **Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil.** *Geoderma Regional*, v. 13, p. 15-25, 2018.

BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. **Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil.** *Soil and Tillage Research*, v. 195, art. 104383, 2019.

BLANCO-CANQUI, H., & RUIS, S. J. **No-tillage and soil physical environment**. *Geoderma*, v.326, p. 164-200, 2018.

BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B. de; OLIVEIRA, B. G. de; LA SCALA JÚNIOR, N. **Sustainability of sugarcane production in Brazil**. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, n. 2, art. 13, 2018.

BORGES, L. F. D. S. et al. **Impactos ambientais e sociais causados pela queima da cana-de-açúcar**. *Monumenta-Revista Científica Multidisciplinar*, v. 1, n. 1, p. 73-83, 2020.

BRASIL. **Decreto n. 76.593, de 14 de novembro de 1975**. Institui o Programa Nacional do Alcool e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 15257, 14 nov. 1975.

BRASIL. **Lei n. 15.042, de 11 de dezembro de 2024**. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Brasília, DF: Presidência da República, 2024.

CALFA, C. H. **Efeito da subsolagem sobre atributos físicos de um latossolo amarelo distrófico argissólico cultivado com citros no estado da Bahia**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 11–16, jan. 2018. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/898812/1/3461.pdf>. Acesso em: 9 out. 2025.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. **Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence**. *Soil Science Society of America Journal*, v.56, n. 3, p.777-783, 1992.

CARVALHO, L. A. et al. **Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro-oeste do Brasil**. *Revista de Ciências Agrárias*, Lisboa, v.34, n.1, p.200-211, 2011.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. de O.; BARBOSA, L. C.; MENANDRO, L. M. S.; CARVALHO, J. L. N. **Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil**. *BioEnergy Research*, v. 12, p. 789-800, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10000-1>.

CHERUBIN, MAURÍCIO R. et al. **Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil**. *PloS one*, v. 11, n. 3, p. e0150860, 2016.

CONAB. **Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica**. Brasília, DF, 18 abr. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie->

historica#:~:text=e%20Promo%C3%A7%C3%A3o%20Institucional-produ%C3%A7%C3%A3o%20brasileira%20de%20cana,Nacional%20de%20Abastecimento%20(Conab). Acesso em: 23 abr. 2024.

CONAB. **Boletim - Cana-de-açúcar - 4º levantamento - 2024/25**. Brasília, DF, 17 abr. 2025. Disponível em : <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/4o-levantamento-safra-2024-25/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2024-25>. Acesso em : 17 mar. 2026

CONAB. **Errata - Boletim - Cana-de-açúcar - 3º levantamento - 2025/26**. Brasília, DF, 02 jan. 2026. Disponível em : https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/2o-levantamento-safra-2025-26-1/e-book_boletim-de-safras-cana_3o-lev-2025. Acesso em: 17 mar. 2026.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. **Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados**. Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

CONTE, A. M. et al. **Avaliação de atributos físicos do solo em diferentes anos de cultivo de cana-de-açúcar**. Agrarian, v. 6, n. 22, p. 415-422, 2013.

COTRUFO, M. F.; WALLENSTEIN, M. D.; BOOT, C. M.; DENEFF, K.; PAUL, E. **The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?** *Global Change Biology*, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. **Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter**. *Nature Geoscience*, v. 12, n. 12, p. 989-994, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.

DENARDIN, J. E. et al. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, v. 15, 2012.

DE OLIVEIRA, I. N. et al. **Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings**. *Soil and Tillage Research*, v. 223, p. 105460, 2022.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA Special Publication, 35).

DOS SANTOS FERNANDES, C. H.; TEJO, D. P.; ARRUDA, K. M. A. **Desenvolvimento do sistema de plantio direto no Brasil: Histórico, implantação e culturas utilizadas.** Uniciências, v. 23, n. 2, p. 83-88, 2019.

IEA. **Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista.** 2014
Disponível em:
<https://iea.agricultura.sp.gov.br/Relat%C3%B3rioConsolidado1512.pdf>. Acesso em: 26 mar 2026.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde.** Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

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. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

LIMA, C. E. P.; FONTENELLE, M. R.; MADEIRA, N. R.; SILVA, J. da; GUEDES, Í. M. R.; SILVA, L. R. B.; SOARES, D. C. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 4, p. 378-387, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; SCHULTZ, N., ANJOS; L.H.C.D; SILVA, E.M.R.D. **Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica.** *Ciência Rural*, v.39, p.1067-1072, 2009.

MARASCA, I. **Avaliação dos atributos físicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar em área com adequação de relevo, utilizando equipamento de preparo profundo e canteirizado do solo.** 2014. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia) -Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

MELO, N. C.; FERNANDES, C.; SOARES, E. R.; COUTINHO, E. L. M. **Growth and productivity of sugarcane cultivated in soils submitted to chiseling in the planting row and in total area.** *Journal of Agricultural Science*, v. 11, n. 1, p. 515-526, 2019. DOI: 10.5539/jas.v11n1p515.

MOTA, J. C. A.; ALVES, C. V. O.; FREIRE, A. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N. **Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau – CE, Brazil.** *Soil and Tillage Research*, [S.l.], v. 140, p. 66-73, 2014.

NANZER, M.C.; ENSINAS, S.C.; BARBOSA, G.F.; BARRETA, P.G.V.; DE OLIVEIRA, T.P.; DA SILVA, J.R.M.;PAULINO, L.A., **Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado.** *Revista de Ciências Agroveterinárias*,v. 18, n. 1, p. 136-145, 2019.

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico; FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034. Paris: OECD Publishing; Roma: FAO, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1787/601276cd-en>.

PIMENTEL, M. L.; OLIVEIRA, A. B. de; SCHIEBELBEIN, B. E.; CARVALHO, M. L.; TENELLI, S.; CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; BRIEDIS, C.; PANOSSO, A. R.; BORDONAL, R. de O. **Quantity, quality and physical protection of soil carbon associated with sugarcane straw removal in southern Brazil.** *Soil and Tillage Research*, v. 237, art. 105976, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105976>.

REEVES, D. W. **The role of soil organic matter in maintaining quality in continuous cropping systems.** *Soil and Tillage Research*, v. 43, n. 1-2, p. 131-167, 1997.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SIX, J. et al. **Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils.** *Plant and soil*, v. 241, n. 2, p. 155-176, 2002.

SOUZA, F. C. A. et al. **Do Alterations in Soil Physical Attributes Resulting from Chiseling Persist after Sugarcane Planting?** *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 53, n. 4, p. 521–532, 2022.

TANG, H. et al. **Effects of tillage management on soil organic carbon mineralization under double cropping rice system of southern China.** *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 21146, 2024.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro, Embrapa. 573p., 2017.

TENELLI, S.; BORDONAL, R. de O.; BARBOSA, L. C.; CARVALHO, J. L. N. **Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed?** *BioEnergy Research*, v. 12, p. 764-777, 2019.