

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

JULIO CÉSAR CALIXTO COSTA

**USO DE BRAQUIÁRIA COMO PLANTA DE COBERTURA EM
CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SOLO ARENOSO: MELHORIA
NA AGREGAÇÃO E NO ESTOQUE DE CARBONO**

RECIFE

2025

Julio César Calixto Costa

Engenheiro Agrônomo

Uso de braquiária como planta de cobertura em cultivo de cana-de-açúcar em solo arenoso: melhoria na agregação e no estoque de carbono

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Ademir de Oliveira Ferreira

Coorientador: Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

**Recife
2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecária Suely Manzi – CRB/4 - 809

C837u Costa, Julio César Calixto.

Uso de braquiária como planta de cobertura em cultivo de cana-de-açúcar em solo arenoso : melhoria na agregação e no estoque de carbono/ Julio César Calixto Costa. – 2025.

77 f.: il.

Orientador: Ademir de Oliveira Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui bibliografia e anexo(s).

1. Densidade de semeadura 2. Conservação do solo 3. Controle da erosão 4. Saccharum officinarum 5. Cana-de-açúcar 6. Brachiaria ruziziensis 7. Capim brachiaria 8. Gramínea forrageira I. Ferreira, Ademir de Oliveira, orient. II. Título

CDD 631.4

JULIO CÉSAR CALIXTO COSTA

Uso de braquiária como planta de cobertura em cultivo de cana-de-açúcar em solo arenoso: melhoria na agregação e no estoque de carbono

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre/Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 31 de julho de 2025

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Dr. William Ramos da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Cléver Briedis

Universidade Federal de Viçosa

Ao homem que nunca desistiu dos seus
sonhos, àquele que está progredindo
gradativamente, àquele que irá atingir
zonas extraordinárias: a mim.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de fazer e ser diferente diante de todas as adversidades encontradas nesse percurso e a todos que se fizeram presentes. De nada vale viver uma vida sem propósitos.

À minha família, Cláudia Suely (mãe) e Julia Karine (irmã) por sempre estarem presentes e compreenderem as ausências que me fizeram chegar até aqui.

Ao meu grande avô Serafim (*in memoriam*), sua simplicidade e sabedoria me inspiraram a ser o homem que estou me tornando hoje. O seu nome será ecoado por todos os locais que eu passar, te levarei em meu coração para sempre.

A Raví Emanuel de Melo, por toda contribuição e parceria durante essa fase importante da minha vida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE e ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, por todo suporte técnico oferecido para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do processo 131751/2023-9 pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Ademir de Oliveira Ferreira, por todo ensinamento transferido durante esse período. O resultado final desta pesquisa não seria o mesmo sem sua orientação.

Ao meu coorientador, Prof. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira, pela contribuição e disponibilidade da área de estudo.

Ao meu grupo de pesquisa em Manejo do Solo. Agradeço a todos, especialmente ao Dr. Felipe Fracetto, Dr. Willian Ramos, Rafaela Santos, Taciana Paraizo e Amanda Alves por todo suporte desde a coleta às análises em laboratório.

À Usina Giasa por conceder a área de estudo para realização desta pesquisa, especialmente ao Silas pela disponibilidade, e a todos que se fizeram presentes na coleta do material analisado.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pelo conhecimento compartilhado.

Aos laboratórios de Física do Solo, Química Ambiental de Solos e Microbiologia do Solo pela disponibilidade para realização de análises específicas.

Às amigas que fiz durante esse percurso e a todos que contribuíram direta e indiretamente para finalização desta etapa profissional da minha vida.

*É preciso, desde a infância,
Ir preparando o futuro;
Para chegar à abundância,
É preciso trabalhar.
Não nasce a planta perfeita,
Não nasce o fruto maduro;
E, para ter a colheita,
É preciso semear...*

Olavo Bilac

Uso de braquiária como planta de cobertura em cultivo de cana-de-açúcar em solo arenoso: melhoria na agregação e no estoque de carbono

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com relevância na produção de biocombustíveis e alimento, com impacto no cenário socioeconômico. Embora o principal polo produtor seja a região Centro-Sul, estados do Nordeste como Alagoas, Pernambuco e Paraíba também se destacam. A expansão do monocultivo intensificou problemas edáficos, sobretudo em áreas com solos arenosos – caracterizados por baixa matéria orgânica, baixa retenção hídrica e alta permeabilidade. Nesse cenário, recomenda-se o uso de material orgânico via práticas conservacionistas, como o uso de cobertura vegetal, especialmente com gramíneas do gênero *Brachiaria*, devido à boa adaptação, ciclagem de nutrientes e alta produção de biomassa. Assim, torna-se essencial investigar esses sistemas em solos arenosos, com ênfase nas diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária, a fim de otimizar o manejo e promover a sustentabilidade da produção agrícola por meio da escolha de densidades mais adequadas. Diante do exposto, objetivou-se avaliar o efeito da braquiária como planta de cobertura em cultivo de cana-de-açúcar sobre a melhoria da agregação e no estoque de carbono em solo arenoso. O estudo foi desenvolvido na Usina Giasa, situada em Pedras de Fogo – PB, utilizando delineamento de blocos casualizados sob parcelas subdivididas e quatro repetições. A parcela principal foi constituída pelas densidades de semeadura de capim-braquiária, sendo elas: 0 (D0), 10 (D10), 30 (D30) e 50 (D50) kg ha⁻¹ de sementes plantadas. As subparcelas constituiu-se pelas profundidades de coleta, sendo: 0-10 (P1); 10-20 (P2) e 20-40 cm (P3). Foram coletados blocos indeformados e amostras deformadas de solo. Realizou-se a caracterização físico-química da área experimental. Avaliaram-se o teor e o estoque de carbono orgânico total (COT), particulado (COP) e associado a minerais (COAM), além da distribuição dos macroagregados por classes de tamanho, por meio de tamisamento úmido. Os dados foram submetidos à análise de variância através do programa SISVAR, com aplicação do teste F e, quando significativo a 5%, aplicou-se o teste LSD para comparação de médias. Os teores e estoques das frações de carbono foram analisados de forma isolada, para avaliar o efeito de densidade de semeadura. Houve significância estatística para as diferentes frações de carbono nos teores e estoques, com destaque para a densidade de semeadura D10 e D30. É observado que, independentemente do tratamento, o COAM representa a maior parcela do C, variando de 88,51% (D30) a 90,73% (D10). Houve influência da densidade de semeadura em relação ao diâmetro médio geométrico e ponderado, e da profundidade no índice de estabilidade de agregados. Na classe de macroagregados extragrandes as densidades D10 e D30 destacaram-se por exibir as maiores proporções. De forma geral, é observado que, em todas as classes de macroagregados analisadas e nas distintas profundidades, os maiores estoques de COT e COP estão associados às densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária. A distribuição de macroagregados extragrandes é maior nas camadas mais superficiais do solo. O uso de capim-braquiária como planta de cobertura no cultivo de cana-de-açúcar impacta positivamente a melhoria da agregação do solo e no acúmulo de C nas frações, sob condições arenosas e em curto prazo. Densidades entre 10 e 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária são recomendadas para utilização em sistemas com uso de cobertura por exibirem melhor desempenho em relação a maioria das variáveis estudadas.

Palavras-chave: Práticas conservacionistas. Densidades de semeadura. *Saccharum officinarum* L. *Brachiaria ruziziensis*.

Use of *Brachiaria* as a cover crop in sugarcane cultivation on sandy soil: improvement in aggregation and carbon stock

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugarcane, playing a pivotal role in the supply of both biofuels and food, with strong implications for the socioeconomic landscape. Although the main production hub is located in the Center-South region, Northeastern states such as Alagoas, Pernambuco, and Paraíba also stand out. The expansion of monocropping has intensified soil-related problems, particularly in sandy soils—characterized by low organic matter content, low water retention capacity, and high permeability. In this context, the application of organic material through conservation practices, such as the use of cover crops, is recommended. Grasses of the genus *Brachiaria* are particularly suitable due to their high adaptability, efficient nutrient cycling, and substantial biomass production. Therefore, investigating these systems in sandy soils is essential, with emphasis on different seeding densities of *Brachiaria* grass, in order to optimize management practices and promote the sustainability of agricultural production through the selection of the most appropriate densities. Based on this premise, the objective of the present study was to evaluate the effect of *Brachiaria* as a cover crop in sugarcane cultivation on soil aggregation and carbon storage in sandy soil. The study was conducted at the Giasa Sugar Mill, located in Pedras de Fogo, Paraíba State, using a randomized block design in a split-plot arrangement with four replications. The main plots consisted of seeding densities of *Brachiaria* grass: 0 (D0), 10 (D10), 30 (D30), and 50 (D50) kg ha⁻¹ of sown seeds. The subplots were defined by soil sampling depths: 0–10 cm (P1), 10–20 cm (P2), and 20–40 cm (P3). Both undisturbed soil blocks and disturbed soil samples were collected. The experimental area was subjected to physical and chemical characterization. Total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), and mineral-associated organic carbon (MAOC) contents and stocks were determined, along with the distribution of macroaggregates by size classes using wet sieving. Data were analyzed through analysis of variance (ANOVA) with the SISVAR software. The F-test was applied, and when significant at the 5% level, the LSD test was used for mean comparison. The contents and stocks of carbon fractions were analyzed individually to assess the effect of seeding density. Significant effects were observed for the different carbon fractions in both contents and stocks, with D10 and D30 standing out. Regardless of treatment, MAOC accounted for the largest share of carbon, ranging from 88.51% (D30) to 90.73% (D10). Seeding density influenced the mean geometric and mean weighted diameters, while depth affected the aggregate stability index. In the extra-large macroaggregate class, D10 and D30 exhibited the highest proportions. Overall, across all macroaggregate size classes and sampling depths, the highest stocks of TOC and POC were associated with seeding densities of 10 and 30 kg ha⁻¹ of *Brachiaria* grass. The proportion of extra-large macroaggregates was greater in the surface layers. The use of *Brachiaria* as a cover crop in sugarcane cultivation positively influenced soil aggregation and carbon accumulation in its fractions under sandy soil conditions in the short term. Seeding densities between 10 and 30 kg ha⁻¹ of *Brachiaria* are recommended for cover crop systems, as they provided superior performance in most of the evaluated variables.

Keywords: Conservation practices. Seeding densities. *Saccharum officinarum* L. *Brachiaria ruziziensis*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo no município de Pedras de Fogo – Paraíba	23
Figura 2 – Histórico da área de estudo no município de Pedras de Fogo – Paraíba	24
Figura 3 – Abertura de trincheira e acondicionamento de agregados do solo.	26
Figura 4 – Distribuição da fração lábil (COP) e estável (COAM) nos tratamentos avaliados na profundidade de 0-40 cm	41
Figura 5 – Correlação de Pearson (r) entre os atributos analisados	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química da vinhaça utilizada na área experimental	24
Tabela 2 – Combinações dos fatores do experimento.....	25
Tabela 3 – Análise dos atributos químicos do solo em sistema com uso de cobertura em diferentes densidades de semeadura	27
Tabela 4 – Valores médios das frações granulométricas do solo na área experimental	28
Tabela 5 – Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total dos tratamentos analisados na área experimental	29
Tabela 6 – Carbono orgânico total, particulado e associado a minerais dos tratamentos analisados na área experimental	35
Tabela 7 – Efeito da densidade de semeadura do capim-braquiária no estoque de carbono orgânico total	37
Tabela 8 – Efeito da densidade de semeadura do capim-braquiária no estoque de carbono orgânico particulado	39
Tabela 9 – Efeito da densidade de semeadura do capim-braquiária no estoque de carbono orgânico associados a minerais	40
Tabela 10 – Valores para classificação da correlação de Pearson (r)	44
Tabela 11 – Diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade de agregados nos tratamentos avaliados	46
Tabela 12 – Massa proporcional de agregados nas densidades de semeadura de capim-braquiária	50
Tabela 13 – Porcentagem de C nas densidades de semeadura de capim-braquiária	51

Tabela 14 – Massa da classe de agregados nas densidades de semeadura de capim-braquiária 52

Tabela 14 – Massa da classe de agregados nas densidades de semeadura de capim-braquiária 53

LISTA DE ABREVIATURAS

ad – adimensional

C – carbono

COAM – carbono orgânico associado a minerais

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

COP – carbono orgânico particulado

COT – carbono orgânico total

D10 – Densidade populacional de 10 kg ha⁻¹ de capim-braquiária

D30 – Densidade populacional de 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária

D50 – Densidade populacional de 50 kg ha⁻¹ de capim-braquiária

DMG – diâmetro médio geométrico

DMP – diâmetro médio ponderado

IEA – índice de estabilidade de agregados

m – Saturação por Alumínio

MCA – massa da classe de agregados

MPA – massa proporcional de agregados

Pt – porosidade total

P1 – Profundidade de 0-10 cm

P2 – Profundidade de 10-20 cm

P3 – Profundidade de 20-40 cm

SB – Soma de Bases

t – CTC efetiva

T – CTC total

V – Saturação por Bases

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Hipótese	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	15
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Cultura da Cana-de-açúcar: Contexto e Importância Socioeconômica.....	17
2.2 Manejo de solos arenosos	18
2.3 Matéria orgânica como atributo chave da qualidade dos solos arenosos.....	20
2.4 Rotação entre capim-braquiária e cana-de-açúcar	22
2.5 Efeito do uso da braquiária na agregação do solo e no estoque de carbono.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Histórico e caracterização da área de estudo	26
3.2 Delineamento experimental, condução do experimento e coleta das amostras.....	28
3.3 Análise físico-química do solo.....	29
3.5 Carbono orgânico total, particulado e associados a minerais do solo	32
3.6 Estabilidade de agregados e estoque de COT e COP intra-agregado	34
3.7 Análise estatística.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Carbono orgânico total, particulado e associado a minerais do solo sob diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária	38
4.2 Estoques das frações de carbono orgânico do solo e distribuição das frações lábil e estável sob diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária	40
4.4 Correlação de Pearson (r)	46
4.5 Índices de agregação do solo e análise das classes de macroagregados	48

<i>4.5.1 Diâmetro médio geométrico, Diâmetro médio ponderado e Índice de estabilidade de agregados</i>	<i>48</i>
<i>4.5.2 Massa proporcional de agregados (MPA), Massa da classe de agregados (MCA), Porcentagem, Estoque de C e COP nas classes de macroagregados</i>	<i>51</i>
5 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXO A – PRODUTIVIDADE E PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PERÍODO DE EXPERIMENTO.....	75

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo. Pertencente à família das gramíneas (Poaceae), esta cultura semiperene é originária de regiões tropicais e se constitui como a principal matéria-prima responsável pela produção de grande parte do açúcar e do etanol mundial. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, com produção concentrada principalmente na região centro-sul do país, fato que destaca a relevância econômica e social desta cultura. A região Nordeste, por sua vez, enfrenta desafios relacionados à baixa produtividade da cana-de-açúcar, influenciada pelas condições edafoclimáticas menos favoráveis, bem como, pelo uso limitado de técnicas avançadas de cultivo, embora esteja entre as regiões de maior produção. Dentro desse cenário, o estado da Paraíba se destaca entre os principais produtores, reafirmando sua importância na produção regional.

A expansão do monocultivo da cana-de-açúcar agravou a compactação do solo, aumentando os riscos de erosão e degradação da terra, contribuindo com as perdas de carbono e nutrientes do solo. Essa expansão impulsionou a produção em áreas de maior vulnerabilidade ao manejo, especialmente em regiões com solos arenosos. Estes solos ocupam uma porcentagem relativa do território nacional e com o avanço em pesquisas, estão inseridos no processo produtivo de diferentes culturas, incluindo a cana-de-açúcar. No entanto, em decorrência do uso intensivo e ausência de manejo adequado, solos com essa classe textural tendem a sofrer processos de degradação rapidamente, tornando-se necessário a adoção de sistemas que minimizem este impacto. Nesse contexto surge o uso de plantas de cobertura, que consiste na introdução de espécies vegetais associadas ou em sucessão à cultura principal, no intuito de otimizar o uso da terra, reduzir o desperdício de recursos e melhorar a produtividade agrícola. No mais, essas espécies auxiliam na proteção do solo, atuando na ciclagem de nutrientes, reduzindo processos erosivos e aumentando a matéria orgânica. Assim, a avaliação desses sistemas é fundamental para fornecer *insights* a respeito do impacto ocasionado sobre os constituintes do solo.

Os solos arenosos possuem baixo teor de matéria orgânica, baixa retenção de água e alta permeabilidade, sendo recomendada a introdução de material orgânico para melhorar essas propriedades. Nessa perspectiva, o uso de gramíneas do gênero *Brachiaria* se apresenta como uma alternativa viável, com boa adaptação às condições tropicais e subtropicais, elevado potencial de ciclagem de nutrientes e produção de biomassa. Esse aumento da biomassa no uso de cobertura pode fornecer mais matéria orgânica ao solo,

promovendo o incremento no acúmulo de carbono orgânico do solo, que é considerado um indicador chave da qualidade do solo por fornecer nutrientes e energia para o crescimento das plantas e organismos do solo, além de estar relacionado aos processos de formação e estabilização de agregados, entre outros fatores. Contudo, ainda existem lacunas de conhecimento a respeito do uso de capim-braquiária como planta de cobertura no cultivo de cana-de-açúcar, especialmente no que se refere à agregação do solo e ao comportamento das frações de carbono em regiões produtoras sob solos arenosos. Nesse contexto, torna-se primordial a realização de pesquisas que avaliem diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária, visando compreender como o manejo populacional interfere no aporte vegetal, na estabilidade dos agregados e no comportamento das frações de carbono no solo.

Portanto, considerando a relevância social e econômica da cana-de-açúcar e a importância do uso de cobertura vegetal para melhoria da qualidade do solo, se faz necessário a investigação desses sistemas em regiões de cultivo sob solo arenoso, visando fornecer informações que otimizem o manejo com diferentes densidades de semeadura e garantam a sustentabilidade da produção agrícola.

1.1 Hipótese

O aumento na densidade de semeadura da braquiária melhora a estruturação do solo e os estoques de C em cultivos de cana-de-açúcar sob solos arenosos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da braquiária como planta de cobertura em cultivo de cana-de-açúcar sobre a melhoria da agregação e no estoque de carbono em solo arenoso.

1.2.2 Objetivos Específicos

Quantificar a distribuição (%) de macroagregados pequenos (0,25-2 mm), grandes (2-8 mm) e extragrandes (8-19 mm) do solo.

Avaliar o teor e os estoques das frações de carbono (COT, COP e COAM) nas profundidades de 0-10; 10-20 e 20-40 cm.

Determinar o diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade de agregados nas distintas profundidades do solo e entre as diferentes densidades de semeadura.

Determinar o estoque de carbono orgânico total (COT) em todas as classes de macroagregados e o carbono orgânico particulado (COP) na classe extragrande.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da Cana-de-açúcar: Contexto e Importância Socioeconômica

A produção de cana-de-açúcar no Brasil para a safra 2024/25 foi estimada em 685,86 milhões de toneladas, representando uma redução de 3,8% em relação à safra anterior (CONAB, 2024). No entanto, o país segue sendo o maior produtor mundial (FAO, 2022), com um aumento de 50% na área de cultivo de cana-de-açúcar na última década (LUZ et al., 2020), especialmente sobre áreas de pastagens degradadas e solos arenosos (MORAES; TAVARES FILHO; MELO, 2022). Cultivada em zonas subtropicais e tropicais em todo o mundo (HUANG; HARTEMINK, 2020) esta cultura é capaz de fixar grandes quantidades de CO₂, apresentando ampla adaptabilidade, elevada produção de biomassa e alta eficiência no processo fotossintético, sendo pertencente à família botânica Poaceae (WANG et al., 2025). Os colmos, presentes na parte aérea, são responsáveis pela produção do açúcar e álcool (RODRIGUES; ROSS, 2020). Conforme menciona estes autores, as fases de desenvolvimento da cana são intensamente afetadas por fatores diversos, tais como estado nutricional, tratos culturais e espécies utilizadas no plantio. Desta forma, nota-se a relevância da cana-de-açúcar na produção de biocombustíveis e alimento, bem como, no cenário socioeconômico do país.

A região Centro-Sul responde por mais de 90% da produção nacional de cana-de-açúcar (CARNEIRO et al., 2020), destacando-se como o principal polo produtor do país. Em contrapartida, a região Nordeste apresenta uma das menores produtividades, reflexo que pode ser atribuído as condições edafoclimáticas menos propícias em comparação as regiões Centro-Oeste e Sudeste, além da utilização de técnicas de cultivo menos avançadas (VIDAL, 2024b). Vale destacar que essa cultura possui uma grande demanda hídrica (ZHENG et al., 2021), entretanto, apresenta expansão no cultivo em áreas com solos arenosos, altas temperaturas e chuvas insuficientes (MARIN et al., 2020), assim, esse cenário evidencia a necessidade de adotar estratégias de manejo eficientes, garantindo o crescimento na produção desta cultura de maneira sustentável.

No estado da Paraíba a cana-de-açúcar é a principal cultura no sistema de produção, constituindo uma fonte fundamental de recursos para a economia local (DE ANDRADE PESSOA et al., 2021). Segundo dados da CONAB (2024), o estado apresentou uma produção de 7,6 milhões de toneladas na safra 2023/24, com estimativa de aumento para 7,74 milhões de toneladas na safra 2024/25, fato que reflete o potencial de crescimento do setor e a importância econômica da cultura nesta região. Nessa perspectiva, o município de

Pedras de Fogo, localizado na mesorregião da mata paraibana, recebe destaque por compor a lista dos municípios mais produtores do estado (SILVA; ABRAHAO; JUNIOR, 2021), com produção de 1,17 milhões de toneladas em 2023 (IBGE, 2024).

O aumento no monocultivo de cana-de-açúcar gera preocupações acerca das mudanças críticas na função do solo (CAVALCANTI et al., 2020), especialmente quando associado às mudanças de uso da terra, que podem representar maiores ameaças à qualidade do solo (CANISARES et al., 2020). Esse cenário é ainda mais crítico em solos arenosos, que, devido à baixa fertilidade e alta suscetibilidade à erosão, são particularmente vulneráveis (MORAES; MELO; TAVARES FILHO, 2023). A degradação do solo e a liberação de carbono para a atmosfera estão frequentemente associadas à intensificação do monocultivo (TENELLI et al., 2021). Nesse contexto, a intensificação da mecanização nas operações agrícolas tem aumentado os níveis de compactação do solo, o que resulta em reduções no crescimento radicular e produtividade das culturas (ESTEBAN et al., 2024), afetando negativamente os indicadores físicos do solo em lavouras de cana-de-açúcar ao longo dos anos (BARBOSA et al., 2024). Além disso, em solos arenosos, observa-se baixos teores de carbono orgânico (CHUWONGPANICH et al., 2021) e baixa capacidade de retenção de água (FARNI; SUNTARI; PRIJONO, 2022). Esse cenário reforça a necessidade de atenção para os impactos ambientais potenciais, destacando a importância de práticas de manejo adequadas para minimizar os danos ao solo, especialmente os de caráter arenoso.

Entre as estratégias para minimizar esses impactos na cana-de-açúcar destacam-se a permanência de palhada na superfície do solo, uma vez que sua remoção pode reduzir estoques de carbono orgânico no solo, aumentar a erosão e comprometer a qualidade estrutural do solo (CHERUBIN et al., 2021); o consórcio e a rotação entre culturas, que são estudados como um padrão de plantio agrícola sustentável para aumentar a qualidade do solo e a produtividade das culturas (TANG et al., 2022). Assim, percebe-se a importância de estudos voltados para a mitigação dos impactos provocados sobre o solo, especialmente os de textura arenosa, que promovam a manutenção da produtividade da cana-de-açúcar e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2.2 Manejo de solos arenosos

A produção agrícola em solos arenosos é uma prática comum em diversas regiões do mundo (CORDEIRO et al., 2021), especialmente pela crescente demanda por alimentos.

No Brasil, os Neossolos Quartzarênicos, junto com outros solos arenosos e franco-arenosos, ocupam cerca de 8% do território nacional (SUZUKI et al., 2023). Nessas regiões, os avanços em pesquisas e à utilização de tecnologias têm possibilitado a incorporação de cultivos como cana-de-açúcar, fibras, grãos, pastagens, silvicultura e outros ao processo produtivo (PINTO et al., 2023), contribuindo para o aumento de produtividade. Desta forma, para assegurar o uso sustentável dos solos arenosos, as propriedades físicas e químicas devem ser preservadas, principalmente por práticas de plantio direto, rotação de culturas, manejo de resíduos culturais, aportes de carbono, aumento da quantidade de macroagregados, melhoria na porosidade total, entre outras (SENA et al., 2021).

O cultivo de cana-de-açúcar em ambientes com solos arenosos têm sido objeto de estudos em diferentes regiões do Brasil e no mundo, como em Pernambuco (CAVALCANTI et al., 2020), no Paraná (VIANA et al., 2023), nos Estados Unidos (COTO ARBELO et al., 2021), no Paquistão (SAJID et al., 2023), na Tailândia (E-SA et al., 2024), na Índia (KUMAR et al., 2024), entre outros, ressaltando a importância de tornar estes solos produtivos através de práticas adequadas e a possibilidade de ampliar a produção agrícola, especialmente com práticas de rotação de culturas em diferentes densidades de semeadura. Essa ampliação na produção visa atender as demandas de uma população em constante crescimento (MAJEED et al., 2022).

Os solos arenosos apresentam alguns desafios para a agricultura, como baixa agregação, ausência de estruturação, fácil compactação, ocorrência de processos erosivos, entre outros (HARIYONO et al., 2022), influenciados, principalmente, pelo manejo adotado. Apesar dessas limitações, tais solos são favoráveis para mecanização, quando manejados com práticas sustentáveis (PINTO et al., 2023), no entanto, sob uso agrícola intensivo, sem adoção de práticas de manejo conservacionistas, esses solos tendem a sofrer processos de degradação rapidamente (CAPOANE et al., 2024). Nesse sentido, adotar sistemas de produção que promovam o acúmulo de carbono orgânico no solo pode ser uma alternativa (FERREIRA et al., 2022), visto que, essa fração interage com outras funções como fertilidade do solo, ciclagem de nutrientes, temperatura e equilíbrio do pH (ARUNRAT et al., 2020).

A redução da produtividade da cana-de-açúcar tem sido relatada em diversas regiões produtoras, estando associada, entre outros fatores, à intensificação do uso de máquinas agrícolas, que promove a compactação do solo e compromete o crescimento radicular das plantas (WAKGARI et al., 2020; BARBOSA et al., 2021; ESTEBAN et al., 2020;

JIMENEZ et al., 2021). Em especial, os solos de textura arenosa apresentam maiores desafios quanto à sustentabilidade dos sistemas produtivos, devido ao baixo teor de matéria orgânica, baixa retenção de água e alta permeabilidade (LIPIEC et al., 2021). Nesses ambientes, a adição de resíduos orgânicos torna-se fundamental, visto que a matéria orgânica do solo atua como agente cimentante, favorecendo a agregação e promovendo melhoria na estrutura física do solo (RONDON; HERNANDEZ; GUZMAN, 2021; TISDALL, 2020). Estratégias de manejo conservacionistas, como o sistema de plantio direto associado ao aporte contínuo de biomassa, têm se mostrado eficientes na recuperação do carbono orgânico do solo, especialmente em solos com baixa capacidade de retenção (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2021). Além disso, o incremento do carbono orgânico no solo está entre as principais estratégias de mitigação das mudanças climáticas, reforçando a necessidade de práticas que favoreçam sua manutenção e acúmulo (ALENCAR et al., 2024). Nesse sentido, torna-se essencial o manejo adequado e a reposição constante de resíduos vegetais no solo, especialmente através de sistemas de rotação de culturas, visando promover a melhoria das propriedades físico-químicas do solo bem como a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

2.3 Matéria orgânica como atributo chave da qualidade dos solos arenosos

A matéria orgânica é um dos principais agentes cimentantes do solo e tem como função promover o agrupamento de partículas dispersas, microestruturas, micro, meso e macroagregados, resultando na construção da estrutura do solo e formação dos espaços vazios (TORMENA et al., 2023). Segundo os autores, a redução desse componente, causada pela oxidação resultante do uso contínuo de preparo do solo, afeta a funcionalidade e a expressão dos atributos do solo, direcionando-o à processos de degradação. Em contrapartida, seu acúmulo determina o funcionamento efetivo do solo, especialmente quando se considera o armazenamento de nutrientes e o fornecimento às plantas, atividade biológica e diversidade microbiana (FRANZLUEBBERS, 2024), podendo ter efeito positivo no rendimento das culturas em solos em processo de degradação (LAL, 2020).

Considerada o mais importante estoque terrestre de carbono e fonte de nutrientes do solo, a matéria orgânica do solo é formada principalmente por fragmentos de resíduos de plantas e animais na superfície; exsudados de raízes de plantas; biomassa viva do solo; entre outros (ADDESSO et al., 2025). A decomposição ocorre, dentre outros fatores, através da interação entre o material orgânico e os organismos do solo, num processo que

transforma moléculas de menor massa molar em compostos de maior estabilidade química (SILVA et al., 2023), contribuindo com o equilíbrio e funcionamento do sistema. Esse componente desempenha um papel multifuncional na qualidade do solo, influenciando não apenas os processos biológicos, mas também as funções químicas e físicas (MORAIS et al., 2020). A melhoria do solo, influenciada pela matéria orgânica do solo, pode aumentar o rendimento em até 10% nos solos arenosos (LORENZ; LAL; EHLERS, 2019). Nessa perspectiva, é favorável a incorporação de práticas que visem a permanência de material orgânico na superfície do solo, especialmente os de caráter arenoso devido suas particularidades. Tais práticas podem envolver a rotação de culturas com diferentes densidades de semeadura, favorecendo a produção de biomassa e incrementando carbono orgânico ao sistema.

O carbono orgânico do solo refere-se à quantidade de carbono armazenado nos solos, derivado da incorporação de matéria orgânica (LORIA; LAL; CHANDRA, 2024). Ele está intimamente relacionado aos processos de formação e estabilização de agregados, juntamente com a biota do solo (HOK et al., 2021). No entanto, é sensível a mudanças climáticas e práticas de manejo (KAN et al., 2022). Estudos apontam que menores perturbações em sistemas de manejo ocasiona elevação nos estoques de carbono do solo (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2024; PIMENTEL et al., 2024), ressaltando a importância de práticas sustentáveis para a conservação do solo. O esgotamento do estoque de carbono orgânico do solo abaixo da faixa crítica (1,5 - 2% em peso na zona radicular) é o principal fator de degradação e redução da capacidade do solo de gerar serviços ecossistêmicos (LAL, 2023), assim, restaurar o estoque dessa fração é fundamental para o avanço da segurança alimentar e climática global, possibilitando uma solução agrícola para problemas ambientais (LAL, 2021).

A qualidade do solo determina fundamentalmente a capacidade do solo de sustentar a vida e ecossistemas produtivos (POUDEL et al., 2024). Uma avaliação mais precisa pode ser fornecida pela integração de fatores físicos, químicos e biológicos, utilizados de forma combinada como indicadores de qualidade do solo (MAURYA et al., 2020). Nesse contexto, diferentes estudos destacam o carbono orgânico do solo como um indicador essencial dessa qualidade (JOHN, et al., 2020; KRAUSE et al., 2022; KICHAMU-WACHIRA et al., 2024). Aumentar o conteúdo de carbono orgânico no solo pode elevar a capacidade de retenção de água e capacidade de tamponamento, influenciando na melhoria da estrutura do solo, especialmente os de caráter arenoso (GUO; HAN; LI, 2020). Nessa perspectiva, a rotação entre culturas surge como uma alternativa promissora para elevar

essa fração no solo e influenciar no aumento da produção agrícola, especialmente ao avaliar as densidades de semeadura.

2.4 Rotação entre capim-braquiária e cana-de-açúcar

É fundamental adotar práticas de manejo agrícola sustentáveis para garantir níveis de produção economicamente rentáveis de cana-de-açúcar, com menor dependência de fertilizantes (VIAUD et al., 2023). Assim, práticas como a rotação de culturas potencializam a produção e fornecem aporte vegetal para ampliar a melhoria da qualidade do solo, garantindo a sustentabilidade dos sistemas produtivos (D'AMICO-DAMIÃO et al., 2021). Essa prática contribui para a maior eficiência no uso da água, além de auxiliar na redução da erosão do solo, tornando-se uma alternativa viável para aumentar a produtividade das culturas (SINGH et al., 2021).

A rotação de culturas com a cana-de-açúcar é alvo de estudos diversos, incluindo pesquisas com arroz (BUTPHU et al., 2020), leguminosas (DE CASTRO et al., 2021), banana (YAO et al., 2024), entre outros. No entanto, há escassez de trabalhos em rotação com o capim-braquiária em diferentes densidades de semeadura. Soares et al. (2023) apontaram que a rotação entre duas gramíneas foi eficiente para intensificar a produção de biomassa. Nesse contexto, as espécies do gênero *Brachiaria* destacam-se pela boa adaptação às condições tropicais e subtropicais, além de apresentarem alto potencial para ciclagem de nutrientes e entrada de biomassa (CARNEIRO et al., 2020), sendo adotadas recentemente em sistemas de consórcio e cultivo rotacionado no Brasil (GALDOS et al., 2020). Entretanto, poucos são os estudos realizados que avaliaram os impactos entre a rotação de capim-braquiária com a cana-de-açúcar.

Esse sistema de cultivo é uma alternativa para intensificação sustentável da agricultura (SHAHIDULLAH et al., 2024). O capim-braquiária é comumente utilizado como pastagem em sistemas de monocultivo, no entanto, quando rotacionado com outras gramíneas, desempenha também o papel de cultura de cobertura (SOUZA et al., 2024), podendo restaurar a fertilidade do solo, prevenir a perda de nutrientes e aumentar o carbono do solo (GAZOLA et al., 2024). Plantas da mesma família podem compartilhar demandas semelhantes por recursos ambientais, o que pode interferir no desenvolvimento da cultura comercial (FREITAS et al., 2021). Cristina et al. (2023) destacam que a introdução de culturas junto à cana-de-açúcar pode resultar em competição e perdas no rendimento. Essa competitividade inicial entre as espécies vegetais em rotação pode ser minimizada pela

adoção de práticas culturais, como ajustes na densidade de semeadura, que retardam o acúmulo de biomassa pelas espécies forrageiras e melhoram a disponibilidade de água para as plantas (SILVA et al., 2020). Os referidos autores, em estudos com *Brachiaria ruziziensis* apontam a utilização de densidades de semeadura variando de 2 a 8 kg ha⁻¹. Enquanto que Saraiva et al. (2013) em estudos com essa espécie de capim-braquiária avaliaram densidades de 0 a 10 kg ha⁻¹. De forma geral, a densidade de semeadura ideal por área é pouco pesquisada e apresenta grandes variações nas recomendações encontradas na literatura (DO PRADO PAIM et al., 2021). Assim, estudos com densidades de semeadura são primordiais para compreender como o manejo populacional interfere nos constituintes do solo. Fato que confirma a importância de informações acerca das espécies introduzidas a rotação com a cana-de-açúcar, principalmente em solos arenosos devido à escassez de dados.

A rotação de culturas favorece a diversificação da produção agrícola. Nesse contexto, devido ao crescimento inicial lento, a cana-de-açúcar possibilita o plantio de culturas de ciclo curto entre as fileiras (GEETHA et al., 2019). Esse sistema de cultivo altera a diversidade bacteriana do solo e diminui as taxas de doenças das culturas (MALVIYA et al., 2021), contribuindo para melhoria na qualidade do solo. Entretanto, sabe-se que a obtenção de produtividade adequada através da rotação de culturas entre gramíneas em solos com baixa qualidade física é um desafio (TORINO et al., 2020), especialmente pelas diminutas informações disponíveis na literatura. As espécies do gênero *Brachiaria* são uma boa alternativa para cobertura do solo, devido à sua alta produção de massa seca, sistema radicular fasciculado e alta tolerância à deficiência hídrica (DE SOUZA PADILHA et al., 2021). No mais, os autores destacam que essa espécie absorve nutrientes em camadas mais profundas do solo, desenvolvendo-se em condições ambientais desfavoráveis para a maioria das culturas de cobertura. O cultivo de capim-braquiária em sistemas de rotação é benéfico em solos de baixa fertilidade (WENNECK et al., 2021). Logo, há uma viabilidade de uso em sistemas rotacionados, especialmente com a cana-de-açúcar, contudo é fundamental aprofundar as pesquisas sobre os impactos ocasionados em sistemas de cultivo sob solos arenosos.

2.5 Efeito do uso da braquiária na agregação do solo e no estoque de carbono

Uma abordagem eficiente para verificar como os sistemas de manejo afetam o solo, especialmente os mais frágeis, é analisar a dinâmica da agregação e matéria orgânica do

solo (PINTO et al., 2023). Nesse contexto, sistemas agrícolas com gramíneas, quando bem manejados, destacam-se pelo acúmulo de carbono e melhoria da estruturação do solo, principalmente nos horizontes subsuperficiais, devido à ação das raízes que por meio da decomposição, incorporam quantidades consideráveis de matéria orgânica ao sistema (FALCÃO et al., 2020). Contudo, o estoque de carbono no solo em sistemas agrícolas varia amplamente e é influenciado por diversos fatores ambientais, particularmente pelos diferentes sistemas de uso da terra (CHANLABUT; NAHOK, 2023), visto que, dependendo do manejo adotado, os teores de carbono podem continuar estáveis, aumentar ou diminuir em comparação com áreas sem interferência antrópica (DA SILVA et al., 2019). Portanto, o manejo com densidades de semeadura adequadas é fundamental para elevar o estoque de carbono e preservar a qualidade do solo nos sistemas de produção.

A braquiária se tornou uma escolha viável para sistemas de rotação de culturas devido à crescente demanda por agricultura sustentável e à implementação de práticas de conservação (MERLOTI et al., 2023). Quando inserida a esse sistema, contribui para a melhoria na estrutura do solo, promovendo maior agregação, infiltração de água e melhoria na aeração, em virtude das raízes robustas (OLIVEIRA et al., 2020). Além disso, estas gramíneas produzem alta quantidade de biomassa foliar, são resistentes à seca e solos de baixa fertilidade, oferecendo proteção ao ecossistema e promoção de práticas agrícolas sustentáveis (NJARUI; GATHERU; GHIMIRE, 2020). A utilização do capim-braquiária na rotação também é uma estratégia eficiente para aumentar a matéria orgânica no solo e melhorar a qualidade por meio do armazenamento de carbono no mesmo (SOUSA et al., 2024), entretanto, sua aplicação em diferentes densidades de semeadura com a cana-de-açúcar foi pouco estudada.

A agregação do solo é uma propriedade importante para manutenção da estrutura do solo, bem como da produtividade (MUSTAFA et al., 2020), sendo um processo complexo de organização de partículas do solo, que leva à formação de micro e macroagregados (DOS REIS FERREIRA et al., 2020). A formação desses agregados e a decomposição da matéria orgânica do solo ocorre de forma simultânea, resultando em uma distribuição desigual da matéria orgânica do solo, com diferentes graus de decomposição entre agregados de diferentes tamanhos (LIU; HAN; ZHANG, 2020). Altos teores de carbono orgânico lábil no solo e taxas de mineralização são frequentemente associados a frações de macroagregados, em contrapartida, o carbono orgânico associado aos microagregados tende a ser mais protegido fisicamente, tornando-se mais recalcitrante, levando ao desenvolvimento de microagregados estáveis e taxas de decomposição lentas

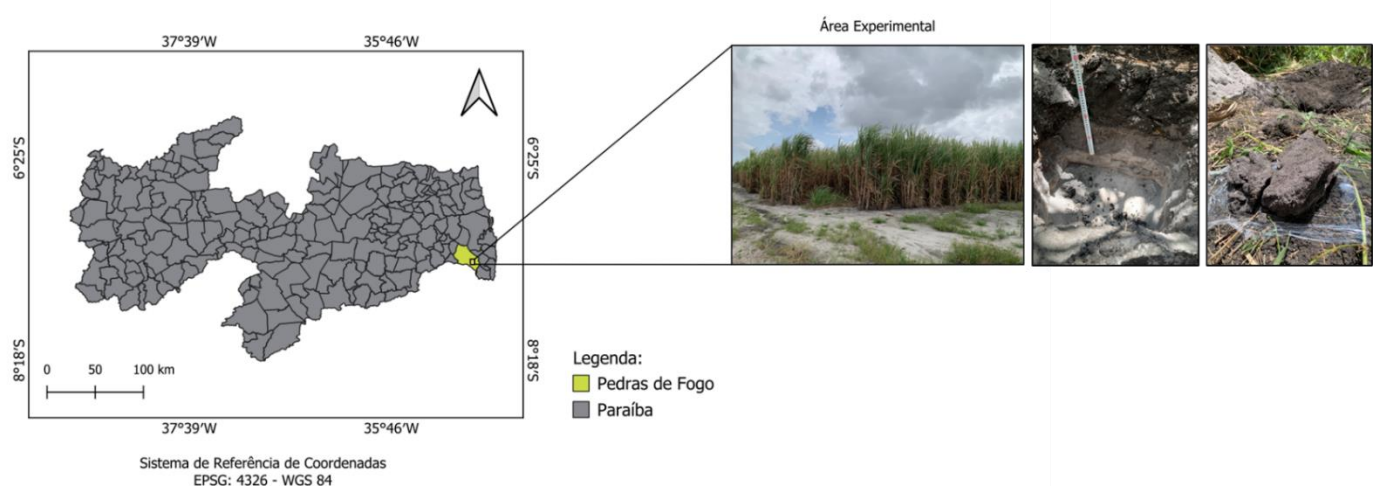
dentro dos agregados do solo (OKOLO et al., 2020). Nesse contexto, a braquiária é inserida visando o aporte de resíduos da parte aérea e radiculares, resultando no aumento de matéria orgânica do solo, o que contribui para a formação de agregados estáveis, devido à ação cimentante que esse atributo exerce sobre as partículas minerais do solo (SILVA et al., 2022). Diante do exposto, nota-se a relevância do capim-braquiária na avaliação dos atributos do solo, entretanto, há uma carência de estudos que analisem as densidades de semeadura na rotação deste capim em plantações de cana-de-açúcar, principalmente em regiões sob solos arenosos, dificultando o entendimento do impacto desse sistema na agregação do solo e nos estoques de carbono.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Histórico e caracterização da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na área experimental da Usina Giasa, situada no município de Pedras de Fogo no estado da Paraíba (Figura 1), com as coordenadas geográficas de 7°21'08.9"S 35°01'33.0"W e altitude de 177 m. De acordo com a classificação de Köppen (1948), esta região apresenta clima do tipo AS', sendo quente e úmido. O município de Pedras de Fogo está inserido na mesorregião da mata Paraibana, englobando a vegetação de Mata Atlântica (SILVA et al., 2019). Segundo os autores, nos últimos anos, a maior parcela dessa vegetação foi substituída por áreas com cultivo de cana-de-açúcar. Fato que destaca a necessidade de estudos que analisem o comportamento dos atributos do solo frente às mudanças de uso.

Figura 1 – Localização da área de estudo no município de Pedras de Fogo - Paraíba.

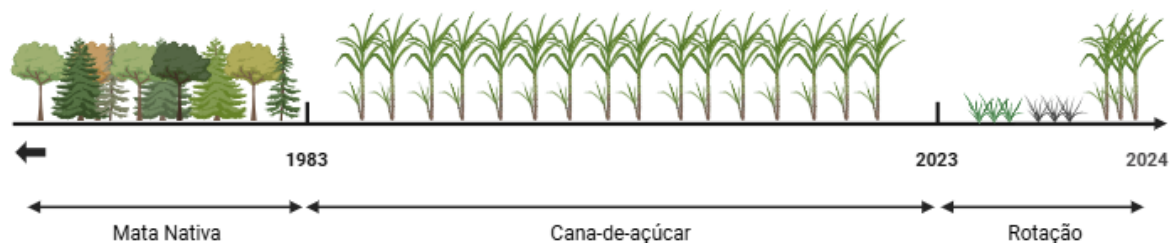


Fonte: Autor (2025).

Entre os anos de 1983-2023 (40 anos) a área de estudo foi manejada com cultivo de cana-de-açúcar. Anterior a isto, o local estava sob domínio de mata nativa. Segundo informações da CPRM (2005), esse município está inserido em uma região onde a vegetação que predomina é do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de Floresta Subcaducifólia e Cerrado/Floresta. O sistema de rotação de culturas com a cana-de-açúcar foi inserido a partir de 2023, com a cultivar CTC 9002. Neste sistema, foi utilizado a gramínea da espécie *Brachiaria ruziziensis* L., conhecida como capim-braquiária. A semeadura do capim-braquiária foi a lanço e ocorreu em fevereiro de 2023. Com 75 dias após o plantio, ocorreu o processo de dessecação mediante utilização do glifosato. Na

sequência, os colmos da cana-de-açúcar foram plantados em sulcos, com espaçamento de 1,5 m entre linhas. O histórico da área pode ser observado na figura 2.

Figura 2 – Histórico da área de estudo no município de Pedras de Fogo - Paraíba.



Fonte: Autor (2025).

De forma padrão, é utilizado pela usina para adubação de fundação 10 t ha^{-1} de cama de aviário; $0,7 \text{ t ha}^{-1}$ de fosfatagem e $0,1 \text{ t ha}^{-1}$ de fertilizante fosfato monoamônico (MAP). Para adubação de cobertura foi utilizado $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ de NPK na formulação 10-00-30. O sistema de manejo foi o mecanizado, desde o plantio à colheita. Durante o período experimental, houve aplicação de vinhaça, com duas lâminas de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, realizada via aspersão com utilização de canhão hidráulico, destaca-se que essa aplicação já ocorre há mais de 20 anos na área experimental da usina. A caracterização deste material pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química da vinhaça utilizada na área experimental.

Análise Química	Unidade	Valor
pH (H ₂ O)	ad.	4,1
M.O	kg m ⁻³	6,0
P ₂ O ₅	kg m ⁻³	0,1
K ₂ O	kg m ⁻³	0,8
Ca	kg m ⁻³	0,2
Mg	kg m ⁻³	0,1

ad – adimensional. Fonte: Athenas Consultoria Agrícola e Laboratórios (2024).

3.2 Delineamento experimental, condução do experimento e coleta das amostras

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC) sob parcelas subdivididas com quatro repetições. A área experimental é composta por quatro blocos, cada um com 5,5 m de largura e 20 m de comprimento.

A parcela principal foi constituída pelas densidades de semeadura de capim-braquiária, sendo elas: 0, 10, 30 e 50 kg ha⁻¹ de sementes plantadas. As subparcelas constituiu-se pelas profundidades de coleta, sendo elas: 0-10; 10-20 e 20-40 cm. São exibidos na Tabela 2 as combinações de fatores do presente estudo.

Tabela 2 – Combinações dos fatores do experimento.

Tratamentos	Densidade de Semeadura (kg ha ⁻¹)	Profundidades (cm)
D0 - P1	0	0-10
D0 - P2	0	10-20
D0 - P3	0	20-40
D10 - P1	10	0-10
D10 - P2	10	10-20
D10 - P3	10	20-40
D30 - P1	30	0-10
D30 - P2	30	10-20
D30 - P3	30	20-40
D50 - P1	50	0-10
D50 - P2	50	10-20
D50 - P3	50	20-40

D0 – cana-de-açúcar sem rotação com capim-braquiária. D10 – densidade com 10 kg ha⁻¹ de capim braquiária. D30 - densidade com 30 kg ha⁻¹ de capim braquiária. D50 - densidade com 50 kg ha⁻¹ de capim braquiária. P1 – profundidade de 0-10 cm. P2 – profundidade de 10-20 cm. P3 – profundidade de 20-40 cm.

Com a finalidade de avaliar os agregados do solo, foram abertas trincheiras com 40 cm de profundidade para coletar os blocos, conforme figura 3, ao final do ciclo da cana-de-açúcar em setembro de 2024. A abertura das trincheiras ocorreu mediante utilização de enxadeco largo, material que também serviu de auxílio para retirada dos blocos de solos. Os blocos foram acondicionados em camadas de plástico filme, visando menores perturbações. Todo material foi transportado para o Laboratório de Manejo e Conservação do Solo e acomodados em prateleiras para posterior análise. Também foram coletadas amostras deformadas de solo nas profundidades de 0-10; 10-20 e 20-40 cm com a utilização de trado holandês, para realização de análises físicas e químicas. Este material foi armazenado em sacos plásticos e transportados para o laboratório acima mencionado.

Figura 3 – Abertura de trincheira e acondicionamento de agregados do solo.



Fonte: Autor (2025).

3.3 Análise físico-química do solo

As amostras deformadas de solo foram passadas por peneira com abertura de 2 mm e colocadas em um ambiente com circulação de ar, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) que, posteriormente, foi utilizada para determinar alguns parâmetros químicos (Tabela 3).

O pH foi obtido por meio de eletrodo em suspensão solo:líquido em água, na proporção de 1:2,5 seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017). Para determinação do fósforo disponível (P), potássio (K^+) e sódio (Na^+) foi utilizado a solução extratora Melich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}), seguindo a metodologia mencionada acima. Posteriormente, a leitura do P disponível foi realizada no espectrofotômetro-UV-Vis, utilizando filtro vermelho no comprimento de onda de 660 nm. A leitura do K^+ e Na^+ foi realizada através de fotômetro de chama.

Para os cátions trocáveis (Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+}) também se utilizou a metodologia de Teixeira et al. (2017) com o KCl 1 mol L^{-1} como solução extratora. A determinação volumétrica do Al^{3+} ocorreu com solução padronizada de $NaOH$ 0,025 mol L^{-1} . Enquanto que, para o $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ e Ca^{2+} a titulação foi realizada com solução padronizada de EDTA 0,0125 mol L^{-1} .

A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) foi determinada pela extração com acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e determinação volumétrica com solução de $NaOH$, seguindo a metodologia proposta por Campos et al. (2017).

A partir da obtenção desses parâmetros e conforme metodologia de Teixeira et al. (2017), foram calculadas a soma de bases (S), CTC efetiva (t), CTC total (T), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

Tabela 3 – Análise dos atributos químicos do solo em sistema com uso de cobertura em diferentes densidades de semeadura.

Prof.	Densidade de Semeadura	pH - H ₂ O	P disponível	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	SB	t	T	V	m
(cm)	(kg ha ⁻¹)	(ad.)	(mg kg ⁻¹)											(%)
0-10	D0	5,6 ^{±0,43}	29,52 ^{±5,86}	0,38 ^{±0,21}	0,02 ^{±0}	3,18 ^{±0,24}	0,85 ^{±0,53}	0,66 ^{±0,13}	11,50 ^{±4,46}	4,43	5,08	15,91	27,77	12,97
	D10	4,9 ^{±0,15}	20,59 ^{±2,71}	0,21 ^{±0,22}	0,02 ^{±0}	2,40 ^{±0,43}	1,03 ^{±0,48}	0,78 ^{±0,12}	11,30 ^{±1,74}	3,66	4,44	14,96	24,45	17,58
	D30	5,4 ^{±0,03}	24,80 ^{±3,19}	0,21 ^{±0,21}	0,03 ^{±0,01}	3,20 ^{±0,16}	0,93 ^{±0,61}	0,62 ^{±0,27}	9,53 ^{±2,66}	4,37	4,98	13,89	31,39	12,52
	D50	5,0 ^{±0,22}	20,98 ^{±7,54}	0,11 ^{±0,05}	0,03 ^{±0,01}	2,78 ^{±0,29}	0,70 ^{±0,08}	0,83 ^{±0,38}	9,59 ^{±3,33}	3,62	4,44	13,20	27,36	18,73
10-20	D0	5,4 ^{±0,25}	22,09 ^{±5,25}	0,36 ^{±0,20}	0,02 ^{±0,01}	2,25 ^{±0,42}	0,95 ^{±0,43}	0,94 ^{±0,43}	10,44 ^{±3,62}	3,58	4,52	14,02	25,54	20,72
	D10	4,9 ^{±0,08}	24,49 ^{±8,45}	0,20 ^{±0,22}	0,03 ^{±0,01}	2,43 ^{±0,57}	0,73 ^{±0,04}	0,91 ^{±0,11}	10,67 ^{±1,78}	3,39	4,30	14,05	24,10	21,18
	D30	5,0 ^{±0,34}	22,81 ^{±6,99}	0,23 ^{±0,19}	0,03 ^{±0,01}	2,18 ^{±0,46}	0,67 ^{±0,39}	0,86 ^{±0,32}	10,28 ^{±3,35}	3,11	3,96	13,38	23,16	21,68
	D50	5,1 ^{±0,21}	22,73 ^{±6,92}	0,11 ^{±0,05}	0,02 ^{±0}	2,25 ^{±0,27}	1,25 ^{±0,56}	0,55 ^{±0,27}	6,78 ^{±2,05}	3,63	4,17	10,40	34,87	13,08
20-40	D0	5,0 ^{±0,29}	21,10 ^{±3,62}	0,37 ^{±0,20}	0,02 ^{±0,01}	2,80 ^{±0,62}	0,85 ^{±0,38}	0,73 ^{±0,33}	9,67 ^{±4,05}	4,04	4,77	13,71	29,48	15,26
	D10	5,5 ^{±0,14}	26,58 ^{±6,35}	0,20 ^{±0,21}	0,03 ^{±0}	2,43 ^{±0,08}	0,88 ^{±0,55}	0,78 ^{±0,19}	8,89 ^{±2,25}	3,54	4,31	12,42	28,40	18,10
	D30	5,0 ^{±0,14}	23,18 ^{±4,20}	0,24 ^{±0,19}	0,03 ^{±0,01}	3,00 ^{±0,63}	0,73 ^{±0,05}	0,55 ^{±0,30}	8,20 ^{±1,82}	4,00	4,55	12,20	32,79	12,01
	D50	5,1 ^{±0,23}	22,83 ^{±5,41}	0,15 ^{±0,03}	0,02 ^{±0,01}	2,90 ^{±0,24}	0,63 ^{±0,36}	0,47 ^{±0,12}	8,16 ^{±2,89}	3,70	4,16	11,85	31,14	11,25

D0 – cana-de-açúcar sem adição de capim-braquiária. D10 – densidade com 10 kg ha⁻¹ de capim braquiária. D30 - densidade com 30 kg ha⁻¹ de capim braquiária. D50 - densidade com 50 kg ha⁻¹ de capim braquiária. ± Desvio padrão. ad – adimensional.

A análise granulométrica (Tabela 4) foi realizada através da metodologia de Donagemma et al. (2017) com adaptações de Gee e Or (2002). Essa abordagem emprega a dispersão mecânica e estabilização da amostra por meio de agitador com solução dispersante. A solução utilizada foi o Calgon. A separação das frações ocorreu por peneiramento e sedimentação. Desta forma, o valor da argila foi determinado pela sedimentação das partículas de silte e areia, enquanto que a massa de areia foi mensurada pela pesagem após a lavagem e secagem do material. A fração silte foi obtida por diferença, conforme metodologia descrita por Almeida (2008).

O solo da área experimental apresenta teores mais elevados na fração areia, com classe textural variando de franco arenoso (0-10) à franco argilo arenoso (10-40 cm). Campos et al. (2021) em estudos sobre a variação nos atributos de um solo arenoso cultivado com cana-de-açúcar após aplicação de vinhaça na usina Giasa em Pedras de Fogo, classifica o solo da área experimental como Argissolo que apresenta textura arenosa.

Tabela 4 – Valores médios das frações granulométricas do solo na área experimental.

Profundidade	Areia	Silte	Argila	Textura
(cm)		(g kg ⁻¹)		
0-10	743 ^{±6,9}	62 ^{±1,0}	195 ^{±7,3}	Franco Arenoso
10-20	638 ^{±3,4}	91 ^{±2,7}	271 ^{±6,6}	Franco Argilo Arenoso
20-40	655 ^{±3,4}	90 ^{±3,2}	255 ^{±5,0}	Franco Argilo Arenoso

± Desvio padrão.

A densidade do solo (Ds) foi realizada em triplicata pelo método da proveta descrito por Almeida et al. (2017a) e indicado para solos arenosos. Nessa metodologia, a obtenção da massa ocorre por pesagem após a compactação da amostra de solo em uma proveta até o volume pré determinado, onde: $Ds (g\ cm^{-3}) = \frac{m \times f}{V}$, sendo m – TFSA em g; f – fator de correção de umidade da amostra e V - volume de solo na proveta, em cm³.

A densidade de partículas (Dp) foi determinada através da metodologia de Viana et al. (2017) e consta com a obtenção da massa da amostra por pesagem e a determinação de seu volume, onde: $Dp (g\ cm^{-3}) = \frac{ma}{(V_T - V_u)}$, sendo ma – massa da amostra seca a 105 °C, em g; V_T – volume total aferido do balão, em mL; V_u – volume utilizado para completar o balão com a amostra, em mL.

Enquanto que a porosidade total foi determinada através do método indireto, proposto por Almeida et al. (2017b), onde: $Porosidade\ total\ (cm^3\ cm^{-3}) = \left[\left(\frac{Dp - Ds}{Dp} \right) \right]$. Os resultados das referidas análises estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5 – Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total dos tratamentos analisados na área experimental.

Profundidade (cm)	Densidade de Semeadura (kg ha ⁻¹)			
	D0	D10	D30	D50
	Densidade do solo (g cm ⁻³)			
0-10	1,46 ^{±0,12}	1,40 ^{±0,08}	1,40 ^{±0,02}	1,42 ^{±0,06}
10-20	1,55 ^{±0,08}	1,38 ^{±0,08}	1,39 ^{±0,02}	1,45 ^{±0,18}
20-40	1,59 ^{±0,09}	1,47 ^{±0,07}	1,51 ^{±0,09}	1,53 ^{±0,05}
	Densidade de Partículas (g cm ⁻³)			
0-10	2,42 ^{±0,14}	2,48 ^{±0,15}	2,59 ^{±0,07}	2,50 ^{±0,08}
10-20	2,52 ^{±0,17}	2,59 ^{±0,09}	2,62 ^{±0,05}	2,66 ^{±0,05}
20-40	2,62 ^{±0,10}	2,58 ^{±0,06}	2,57 ^{±0,02}	2,54 ^{±0,02}
	Porosidade Total (cm ³ cm ⁻³)			
0-10	0,396 ^{±0,03}	0,436 ^{±0,03}	0,460 ^{±0,02}	0,431 ^{±0,01}
10-20	0,385 ^{±0,07}	0,467 ^{±0,02}	0,470 ^{±0,02}	0,454 ^{±0,07}
20-40	0,392 ^{±0,05}	0,430 ^{±0,02}	0,413 ^{±0,04}	0,402 ^{±0,02}

± Desvio padrão.

3.5 Carbono orgânico total, particulado e associados a minerais do solo

O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado pela metodologia de Mendonça e Matos (2005) adaptada de Yeomans e Bremner (1988). Inicialmente, foi moído aproximadamente 2 g de TFSA em almofariz e passado por peneira de 60 mesh (0,2 mm). Posteriormente, foi pesado entre 0,2 – 0,5 g de solo e transferido para tubos de digestão. Foi adicionado 5 ml da solução de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇ 0,167 mol L⁻¹) aos tubos e em seguida 7,5 ml de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). Nestas mesmas condições foram feitos 4 brancos controles, sendo dois aquecidos e os outros dois em temperatura ambiente. Após o pré-aquecimento do bloco digestor até a temperatura de 170 °C, os tubos foram colocados no bloco e mantidos por 30 minutos. Em seguida, o material ficou esfriando por cerca de 15 minutos. O conteúdo de cada tubo foi transferido para erlenmeyers de 250 ml, utilizando-se água destilada suficiente para preencher um volume de cerca de 80 ml. Atingida a temperatura ambiente, foi adicionado 0,3 ml da solução indicadora de Ferroin e a titulação foi realizada com

solução de Sulfato Ferroso Amoniacal $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, com o ponto de viragem passando de verde para violeta-escuro.

A porcentagem de COT foi calculada com base no volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra; do branco aquecido e do branco não aquecido, conforme as seguintes equações:

Equação 1:

$$A = \left[(Vba - Vam) \times \left(\frac{Vbn - Vba}{Vbn} \right) \right] + (Vba - Vam)$$

Em que:

A – volume corrigido de titulação consumido pela amostra.

Vba – volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento.

Vbn – volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento.

Vam – volume gasto na titulação da amostra.

Equação 2:

$$COT \text{ (dag kg}^{-1}\text{)} = \frac{(A) \times (\text{Molaridade Sulf. Ferroso}) \times (3) \times (100)}{\text{peso da amostra (mg)}}$$

Em que:

3 – constante referente ao número de mols de Cr_2O_7^- que reagem com Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de Cr_2O_7^- que reagem com o C (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12).

100 – fator de conversão de unidade (mg mg^{-1} para dag kg^{-1}).

Após esse cálculo, os resultados foram multiplicados por 10 para obtenção do valor em g kg^{-1} .

O carbono orgânico particulado (COP) foi determinado pela metodologia de Mendonça e Matos (2017) adaptada de Cambardella e Elliot (1992). De início, foi pesado 10 g de TFSA em tubos de centrifuga. Posteriormente, adicionou-se 30 ml da solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) aos tubos e, na sequência, colocou-se para agitar por 15 horas em agitador ortogonal. Após esse período, a solução com solo disperso foi passado na peneira de 0,053 mm. O material retido na peneira foi transferido para recipientes de alumínio com peso conhecido e colocado para secar em estufa de circulação de ar a 70°C por 12 horas. Em seguida, foi pesado cerca de 5 g do material seco em estufa e transferido para tubos de digestão. Adicionou-se 5 ml da solução de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$) aos tubos e em seguida 15 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). O restante do procedimento foi semelhante ao realizado para o COT e a quantidade de C orgânico da matéria orgânica particulada foi calculada com

base no volume da solução de Sal de Mohr gasto na titulação da amostra (V_{am}), do branco aquecido (V_{ba}) e do branco não aquecido (V_{bn}), conforme a equação 1 mencionada acima. Posteriormente a isto, o COP foi calculado através da seguinte equação:

Equação 3:

$$COP (g\ kg^{-1}) = \frac{(A) \times (M) \times (R) \times (1000) \times (M_{totalMOP})}{(M_{amMOP}) \times (M_{solo})}$$

Em que:

M – molaridade do sulfato ferroso ($mol\ L^{-1}$).

R – 3, constante referente ao número de mols de $Cr_2O_7^-$ que reagem com Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de $Cr_2O_7^-$ que reagem com o C (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12).

1000 – fator de conversão de unidade ($mg\ mg^{-1}$ para $g\ kg^{-1}$).

$M_{totalMOP}$ – massa total de matéria orgânica particulada (retiro na peneira) (g).

M_{amMOP} – massa da amostra de matéria orgânica particulada utilizada na determinação do carbono (mg).

M_{solo} – massa de solo utilizada na extração da matéria orgânica particulada (g).

O carbono orgânico associado a minerais (COAM) foi determinado pela diferença entre o COT e o COP ($COAM = COT - COP$), conforme metodologia de Mendonça e Matos (2017). Os estoques de COT, COP e COam foram calculados com base na equação: *Estoque de C ($Mg\ ha^{-1}$)* = $C \times Ds \times V$, sendo C – fração de carbono analisada ($ton\ ha^{-1}$); Ds – densidade do solo do tratamento ($ton\ m^{-3}$) e V – volume da camada (m^3).

3.6 Estabilidade de agregados e estoque de COT e COP intra-agregado

O fracionamento das classes de macroagregados foi realizado seguindo a metodologia de Barreto et al. (2009). Os blocos indeformados foram fragmentados pelo ponto de fraqueza e, posteriormente, passados por peneiras com aberturas 20 e 7,1 mm para obtenção de amostras a serem utilizadas na separação via úmida. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao tamisamento úmido pelo método de Yoder (1936) com adaptações de Nimmo e Perkins (2002).

Nessa metodologia foram pesados 25 g de macroagregados. Realizou-se o pré-umedecimento com álcool 96° durante 10 minutos, para evitar o rompimento quando entrassem em contato com a água. Em seguida, o material foi adicionado ao conjunto de peneiras com aberturas de 8, 2 e 0,25 mm, respectivamente e levado ao agitador para separação de agregados do solo (Yoder) durante 15 minutos. Após essa etapa, os macroagregados foram separados em

classes referentes à cada peneira, sendo elas: macroagregados pequenos (0,25 – 2 mm); grandes (2 – 8 mm) e extragrandes (8 – 19 mm). Posteriormente, esses macroagregados foram transferidos para latas de peso conhecido e acondicionados em estufa à 60 °C até atingir peso constante. Também foram adicionados 25 g de agregados em estufa à 105 °C por 24 horas para calcular o fator de correção de umidade.

Desta forma, a partir da secagem dos macroagregados em estufa, foram calculados o diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) seguindo a metodologia proposta por Castro Filho et al. (1998), através das seguintes equações:

Equação 4:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi \cdot wi)$$

Em que:

wi – proporção de cada classe em relação ao total.

xi – diâmetro médio das classes (mm).

Equação 5:

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^N wp \cdot \log \cdot xi}{\sum_{i=1}^N wi}$$

Em que:

wp = peso dos agregados de cada classe (g).

Equação 6:

$$IEA = \left(\frac{Peso \ da \ amostra \ seca - wp25 - areia}{Peso \ da \ amostra \ seca - areia} \right) 100$$

Em que:

wp25 – peso dos agregados da classe < 0,25 mm.

A classe de macroagregados extragrande foi dividida em duas subamostras: a) uma subamostra foi utilizada para quantificar o COT e b) a outra subamostra foi utilizada para determinar o COP, para realização do cálculo de estoque. Nas demais classes (macroagregados pequenos e grandes) foi determinado apenas o COT, levando em consideração a ausência e/ou insuficiência de amostras para determinação da fração COP. Essas determinações seguiram a metodologia proposta por De Oliveira Ferreira et al. (2018).

Inicialmente, foram calculados a massa proporcional de agregados (MPA), a porcentagem de COT e a massa da classe de agregados (MCA) conforme a metodologia mencionada acima, através das seguintes equações:

Equação 7:

$$MPA (\%) = \frac{\text{massa da classe (kg)}}{\sum \text{massa da classe (kg)}} \times 100$$

Equação 8:

$$\text{Porcentagem de COT (\%)} = \frac{COT (g\ kg^{-1}) \text{ em cada CA} \times 100}{\sum COT (g\ kg^{-1})}$$

Equação 9:

$$MCA (Mg\ ha^{-1}) = \frac{\text{massa de solo (Mg)} \times \%COT \text{ em cada classe}}{100}$$

Posteriormente, seguindo a categorização dos macroagregados anteriormente citada, foram determinados os estoques de COT e COP, por meio da equação 10.

Equação 10:

$$\text{Estoque de COT ou COP (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Estoque de COT ou COP (Mg ha}^{-1}\text{) em A} \times COT \text{ ou COP (\% em CA)}}{100}$$

Em que:

A – amostra de solo.

CA – classe de macroagregado.

No presente estudo, optou-se por calcular a massa proporcional de agregados (MPA), porcentagem de C e massa da classe de agregado (MCA) apenas para o carbono orgânico total. Essa escolha deve-se ao fato de que o COT foi determinado de forma abrangente em todas as classes de macroagregados, garantindo consistência e representatividade ao longo do perfil e das densidades de semeadura avaliadas. Por outro lado, o COP ficou restrito apenas a classe extragrande, sendo assim, foi determinado apenas o estoque dessa fração de carbono.

3.7 Análise estatística

No presente estudo, dois enfoques estatísticos distintos foram adotados de acordo com a natureza das variáveis estudadas. Para os atributos físicos do solo (DMG, DMP e IEA), utilizou-se o esquema de parcelas subdivididas, com a profundidade considerada como o fator adicional. Essa abordagem permitiu verificar o comportamento das densidades de semeadura de capim-braquiária ao longo do perfil do solo. Enquanto que, os atributos químicos e os

relacionados à análise de agregados foram analisados de forma isolada por profundidade, visto que o volume de solo difere entre as camadas. Dessa forma, evitam-se possíveis distorções na interpretação dos resultados, visto que, comparações diretas entre profundidades poderiam superestimar os valores obtidos.

Após a verificação da homogeneidade, os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Posteriormente, realizou-se a análise de variância (ANOVA) com auxílio do programa SISVAR® versão 5.8 (FERREIRA, 2011). Quando o teste F indicou significância ao nível de 5% de probabilidade, aplicou-se o teste LSD (Least Significant Difference) para a comparação das médias. Adicionalmente, realizou-se uma correlação de Pearson no intuito de averiguar a relação entre as variáveis analisadas no presente estudo. As correlações foram calculadas com base nos valores médios dos tratamentos através do software Microsoft Excel® 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carbono orgânico total, particulado e associado a minerais do solo sob diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária

De acordo com a tabela 6, foi observado diferença estatística significativa para os teores das frações de carbono analisadas. Para o COT, a densidade de semeadura com 10 kg ha⁻¹ destaca-se em todas as profundidades avaliadas, exibindo os maiores valores médios. Os incrementos em relação ao tratamento sem adição de capim-braquiária (D0) foram de até 32% na camada de 0-10 cm; 35,2% em 10-20 cm e 50,6% em 20-40 cm, refletindo o efeito positivo da referida densidade no acúmulo de carbono orgânico no solo.

Para o COP, foi observado efeito estatístico significativo apenas na profundidade de 20-40 cm. Nessa camada, a densidade de semeadura com 10 kg ha⁻¹ destacou-se por exibir os maiores teores dessa fração lábil do carbono, superando os demais tratamentos analisados. Esse resultado indica que, mesmo em profundidades maiores, a densidade com 10 kg ha⁻¹ de capim-braquiária pode favorecer o acúmulo de COP, refletindo a influência do sistema radicular e do aporte contínuo de resíduos orgânicos sobre o comportamento do carbono no solo.

Tabela 6 – Carbono orgânico total, particulado e associado a minerais dos tratamentos analisados na área experimental.

Profundidade (cm)	Densidade de Semeadura (kg ha ⁻¹)			
	D0	D10	D30	D50
COT (g kg⁻¹)				
0-10	33,57 ^{±4,0} b	44,32 ^{±1,8} a	37,37 ^{±4,3} b	34,54 ^{±1,9} b
10-20	27,97 ^{±1,0} b	37,85 ^{±1,5} a	32,19 ^{±3,0} ab	28,80 ^{±3,9} b
20-40	25,80 ^{±0,4} b	38,85 ^{±2,2} a	28,20 ^{±4,3} ab	27,70 ^{±0,4} b
COP (g kg⁻¹)				
0-10	3,86 ^{±1,0} a	4,18 ^{±1,7} a	4,70 ^{±1,3} a	4,07 ^{±0,7} a
10-20	3,59 ^{±1,5} a	4,11 ^{±1,0} a	4,35 ^{±1,0} a	2,46 ^{±0,7} a
20-40	3,16 ^{±1,2} ab	4,26 ^{±0,9} a	3,91 ^{±0,4} ab	2,60 ^{±0,3} b
COAM (g kg⁻¹)				
0-10	29,71 ^{±3,8} b	40,14 ^{±1,7} a	32,66 ^{±5,0} b	30,46 ^{±2,2} b
10-20	24,37 ^{±2,1} b	33,74 ^{±1,6} a	27,85 ^{±3,6} ab	26,34 ^{±3,6} b
20-40	22,63 ^{±0,9} b	34,59 ^{±1,9} a	24,29 ^{±4,0} ab	25,10 ^{±0,7} ab

Médias seguidas pela mesma letra em linha não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

Wooliver e Jagadamma (2023) verificando a resposta das frações de carbono orgânico do solo à cobertura vegetal, concluíram que as plantas de cobertura podem melhorar o carbono orgânico particulado e associado a minerais, contribuindo com os resultados observados no

presente estudo. Embora o período de cultivo do capim-braquiária no presente estudo tenha sido de curto prazo, os efeitos observados são compatíveis com estudos prévios que destacam o potencial das gramíneas em elevar mais rapidamente os teores de carbono do solo. Segundo os estudos de Rosolem e Garcia (2016) os níveis de carbono em formais lábeis são aumentados de forma mais eficiente por gramíneas em sistemas de curta duração. No mais, o aumento da fração lábil nas camadas superficiais do solo, esteve intimamente relacionado ao desenvolvimento radicular da cultura de cobertura, reforçando os resultados obtidos na camada de 0-10 cm no presente estudo. De forma geral, estes achados fortalecem a eficácia do capim-braquiária como planta de cobertura, mesmo em ciclos reduzidos e sob condições de solo arenoso.

O carbono orgânico associado a minerais (COAM) apresentou comportamento similar ao observado nas demais frações, com destaque para a densidade de semeadura com 10 kg ha⁻¹ de capim-braquiária, que resultou nos maiores teores em todas as profundidades analisadas. Os incrementos em relação ao tratamento sem adição do capim-braquiária (D0) foram de até 35,10% na camada de 0-10 cm; 38,44% em 10-20 cm e 52,85% em 20-40 cm.

Esses resultados reforçam o potencial da referida densidade de semeadura na promoção da estabilização do carbono em formas mais estáveis no solo. Tais valores são, possivelmente, favorecidos através de um ambiente com maior aporte de resíduos vegetais e atividade biológica, decorrentes das condições específicas de campo. De modo geral, o tratamento D10 se destaca ao longo do perfil avaliado, sugerindo que esse arranjo favorece não apenas o acúmulo de carbono, mas também sua estabilização. O sistema radicular fasciculado do capim-braquiária pode contribuir diretamente para esse processo ao promover a liberação de exsudados, os quais estimulam a atividade microbiana e a formação de agregados, condições essenciais para o sequestro de carbono em formas protegidas por minerais do solo.

Estudos como o de Cordeiro et al. (2022) corroboram com os resultados obtidos na presente pesquisa. Os autores, averiguando o comportamento do estoque de carbono orgânico do solo sob culturas de cobertura em solo arenoso, verificaram que o conteúdo de C associado a minerais foi 114% maior no sistema de culturas de cobertura mistas, incluindo gramíneas, quando comparado ao sistema de pousio. De forma geral, os resultados do presente estudo reforçam que o manejo adequado da densidade de semeadura do capim-braquiária pode desempenhar um papel central na melhoria da agregação do solo e no incremento de carbono em frações mais estáveis, contribuindo para a sustentabilidade de sistemas agrícolas em ambientes com limitações edáficas.

4.2 Estoques das frações de carbono orgânico do solo e distribuição das frações lábil e estável sob diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária

Para o estoque de carbono orgânico total (C) observou-se significância estatística ($p < 0,05$) avaliando o efeito da densidade de semeadura do capim-braquiária, conforme visto na tabela 7. O tratamento com 10 kg ha^{-1} (D10) apresentou os maiores valores médios em todas as profundidades avaliadas. Os valores foram superiores em até 31,99% na camada de 0-10 cm, 35,34% na de 10-20 cm e 35,26% na de 20-40 cm em relação ao tratamento sem adição de capim-braquiária como planta de cobertura (D0). Considerando o efeito acumulado, os maiores estoques de C também foram observados na densidade de semeadura com 10 kg ha^{-1} de capim-braquiária, sendo até 34,32% maior em relação a D0. Esses resultados reforçam que densidades menores de semeadura apresentam potencial para fornecer aporte de matéria orgânica ao solo, contribuindo para elevar os estoques de carbono.

Os maiores estoques em profundidade estão associados, também, a camada de solo avaliada (20 cm), que podem reter mais material orgânica em relação a camadas com menores espessuras (10 cm). Garcia, Li e Rosolem (2013) estudando sobre a matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo, destacaram que práticas adequadas, como o uso de plantas de cobertura, podem melhorar significativamente o ambiente para o crescimento das raízes e o desenvolvimento das plantas, com efeitos que estão direta e indiretamente correlacionados às mudanças da matéria orgânica do solo. Comparando ao presente estudo, a adoção das densidades de semeadura pode favorecer tais melhorias, especialmente no tratamento D10, fornecendo um ambiente mais propenso para o desenvolvimento do sistema radicular, estimulando em processos de acúmulo de carbono.

Tabela 7 – Estoque de carbono orgânico total em função da densidade de semeadura do capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de Semeadura (kg ha^{-1})			
	D0	D10	D30	D50
	Estoque de C (Mg ha^{-1})			
0-10	42,85 \pm 5,6 b	61,28 \pm 2,5 a	47,78 \pm 6,0 b	47,99 \pm 2,7 b
10-20	41,16 \pm 1,4 b	51,23 \pm 2,0 a	44,98 \pm 4,2 ab	41,72 \pm 5,4 b
20-40	79,92 \pm 2,1 b	103,52 \pm 2,3 a	82,72 \pm 4,9 ab	85,02 \pm 1,0 ab
0-40	163,93 \pm 5,1 b	216,03 \pm 4,1 a	175,49 \pm 8,0 b	174,73 \pm 5,9 b

Médias seguidas pela mesma letra em linha não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

Considerando as condições edáficas da área experimental – marcada pela textura arenosa, esses incrementos ganham ainda mais relevância, visto que indicam o potencial do uso

de plantas de cobertura como estratégia para mitigação da perda de matéria orgânica em ambientes naturalmente mais suscetíveis a processos de degradação. Além disso, os valores médios elevados dos estoques de carbono podem estar relacionados ao histórico de mais de 20 anos de vinhaça aplicada na área experimental, o que contribui para o aporte contínuo de matéria orgânica ao solo, fornecendo melhoria nas propriedades físico-químicas do solo.

Pesquisas como a Cerri et al. (2011) que observaram maiores taxas de acúmulo de C em sistemas de cana-de-açúcar com manutenção de resíduos vegetais, sugerindo uma possível semelhança aos resultados obtidos neste estudo. Ferraz-Almeira et al. (2022) avaliando o consórcio entre gramíneas em um solo de caráter arenoso, observaram aumentos na matéria orgânica do solo com a utilização de capim-braquiária neste sistema, assemelhando-se ao observado no presente estudo. Esse fato reflete nos incrementos do estoque de C, principalmente em sistemas de rotação com capim-braquiária.

Resultados obtidos por Cardin, Santos e Escarmínio (2016), em um Argissolo Vermelho-Amarelo com textura arenosa – 840 e 793 g kg⁻¹ de areia nas camadas de 0-25 e 25-50 cm respectivamente, indicaram aumento nos teores de matéria orgânica, carbono orgânico do solo e o estoque de carbono total do solo apenas na camada superficial (0-10 cm) após aplicações sucessivas de vinhaça. De forma similar, os resultados observados neste estudo indicaram, de forma estatisticamente significativa, maiores estoques na camada mais superficial do solo (0-10 cm). Desta forma, os dados indicam que o uso do capim-braquiária não apenas aumenta o aporte de resíduos, mas também favorece o incremento de carbono, sendo considerado um diferencial importante frente a manejos convencionais.

O estoque de carbono orgânico particulado (COP) também exibiu diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) avaliando o efeito da densidade de semeadura, conforme visto na tabela 8. Essa fração mais lábil e sensível ao manejo, exibiu maior acúmulo na camada P3, especialmente na densidade de semeadura D30, cujo valor foi até 50,32% superior em relação aos demais tratamentos na referida profundidade. Esse comportamento sugere uma possível translocação da fração do COP, favorecida pela presença do sistema radicular do capim-braquiária, que pode promover maior movimentação de partículas orgânicas e deposição de resíduos em profundidades maiores, bem como, o próprio processo de decomposição das raízes. Esses mecanismos reforçam o papel do capim-braquiária no incremento de carbono em camadas inferiores, o que é relevante para solos de caráter arenoso, visto a limitação na estabilidade da matéria orgânica.

Para o efeito acumulado (0-40 cm) o maior valor médio também foi obtido na densidade de semeadura com 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária, ressaltando o efeito de densidades

intermediárias em incrementar essa fração de carbono no solo. Esse valor foi até 43,76% superior em relação aos demais tratamentos. No mais, a maior eficiência observada no tratamento D30 pode ter associação a um equilíbrio entre a densidade de semeadura e o desenvolvimento do sistema radicular, resultando em uma menor competição entre plantas e um maior aporte de resíduos ao solo. A deposição de material orgânico beneficia o acúmulo dessa fração de carbono, principalmente quando correlacionada à atividade microbiana e à estruturação dos agregados, considerados elementos importantes para manutenção de frações de carbono no solo, especialmente as mais vulneráveis ao manejo.

Tabela 8 – Estoque de carbono orgânico particulado em função da densidade de semeadura do capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de Semeadura (kg ha ⁻¹)			
	D0	D10	D30	D50
	Estoque de COP (Mg ha ⁻¹)			
0-10	5,57 ^{±1,4} a	5,76 ^{±2,4} a	6,48 ^{±1,8} a	5,75 ^{±1,0} a
10-20	5,55 ^{±2,1} a	5,63 ^{±1,4} a	6,07 ^{±1,3} a	3,49 ^{±1,0} a
20-40	9,88 ^{±3,6} ab	11,06 ^{±0,7} ab	11,47 ^{±1,2} a	8,01 ^{±1,0} b
0-40	21,00 ^{±6,6} ab	22,45 ^{±3,0} ab	24,02 ^{±2,8} a	17,25 ^{±0,8} b

Médias seguidas pela mesma letra em linha não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

Resultados diferentes foram observados por Lopes et al. (2017) que não identificaram diferenças estatísticas nos teores de matéria orgânica particulada entre sistemas de manejo com cana-de-açúcar – fato que reflete diretamente no estoque de COP. Estudos apontam que a fração de COP tende a se concentrar nos horizontes superficiais do solo, como evidenciado por Thorburn et al. (2012), que relataram diminuição dos teores com o aumento da profundidade. Ainda segundo os autores, a manutenção contínua de resíduos vegetais favorece a retenção de COP até os 10 cm de profundidade, refletindo em maiores estoques nessa camada. Embora não haja diferença estatística constatada, esse comportamento pode ser observado na profundidade de 0-10 cm com base nos valores médios. Enquanto que, os maiores estoques em profundidade (P3) estão associados à maior espessura da camada de solo avaliada (20 cm), a qual contribui para o acúmulo dessa fração de carbono.

Esse comportamento sugere que a presença contínua de material orgânico proveniente do capim-braquiária, associada à ação do sistema radicular e estruturação do solo, pode favorecer a movimentação e estabilização dessa fração mais lábil em profundidades maiores, especialmente em solos manejados com capim-braquiária como planta de cobertura.

O estoque de carbono orgânico associado a minerais (COAM) exibiu significância estatística ($p < 0,05$) avaliando o efeito da densidade de semeadura, conforme visto na tabela 9. A densidade de semeadura com 10 kg ha^{-1} de capim-braquiária apresentou os maiores estoques nas distintas profundidades avaliadas, com diferença estatisticamente significativa até a camada de 20 cm. Os estoques foram até 35,10% superiores na camada de 0-10 cm e 38,48% em 10-20 cm, quando relacionados ao tratamento sem adição de capim-braquiária (D0). Esses resultados demonstram que o sistema com adição de capim-braquiária como planta de cobertura na cana-de-açúcar auxiliou não somente o acúmulo de carbono no solo, mas também sua estabilização na forma mais estável da matéria orgânica – o COAM, que exibe maior resistência à decomposição por estar fisicamente protegido e quimicamente ligado às partículas minerais. Para o efeito acumulado (0-40 cm) a densidade D10 apresentou os maiores estoques, com valor até 37,30% superior em relação a D0.

Esses resultados reforçam que a presença do sistema radicular do capim-braquiária pode fornecer ambientes propícios à estabilização do carbono, especialmente pela liberação de exsudados radiculares que estimulam a formação e manutenção de agregados estáveis, enquanto que o aporte de resíduos vegetais favorece a retenção de compostos orgânicos nas superfícies dos minerais do solo. Desta forma, o manejo com densidades de semeadura de capim-braquiária associado a cana-de-açúcar torna-se uma alternativa para o sequestro de carbono em solos de caráter arenosos, que naturalmente apresentam capacidade restrita de proteção de carbono.

Tabela 9 – Estoque de carbono orgânico associados a minerais em função da densidade de semeadura do capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de Semeadura (kg ha^{-1})			
	D0	D10	D30	D50
	Estoque de COAM (Mg ha^{-1})			
0-10	43,17 \pm 5,4 b	56,41 \pm 2,1 a	45,26 \pm 7,0 b	43,26 \pm 3,0 b
10-20	37,92 \pm 3,0 b	46,85 \pm 2,2 a	38,91 \pm 4,9 ab	38,23 \pm 4,9 b
20-40	70,78 \pm 2,6 a	94,57 \pm 2,5 a	71,25 \pm 4,1 a	77,01 \pm 1,9 a
0-40	151,87 \pm 4,7 b	197,83 \pm 3,5 a	155,42 \pm 2,7 b	158,50 \pm 5,7 b

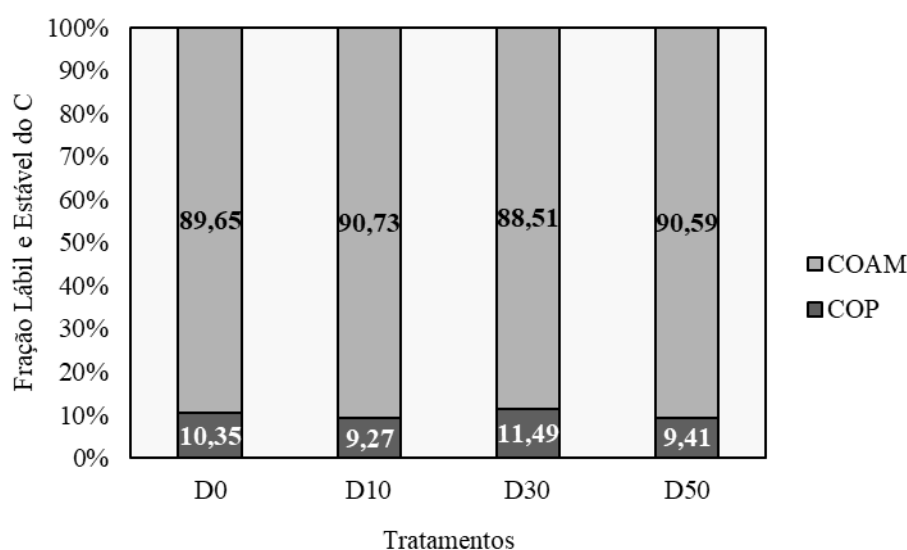
Médias seguidas pela mesma letra em linha não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

Sun et al. (2024) destacaram a fração de COAM como componente estável no solo, apresentando características de baixa sensibilidade às mudanças ambientais, especialmente pelo isolamento físico e proteção mineral, fato que pode ter associação aos resultados obtidos no presente estudo, visto a diferença estatisticamente significativa até a camada de 20 cm.

Esses resultados podem ter relação a distintos fatores, incluindo a vinhaça aplicada na área, o aporte vegetal do próprio capim-braquiária, bem como a ação das raízes na liberação de exsudados, que juntos auxiliam na associação do carbono com as frações minerais do solo em profundidades superficiais. Esses dados são reforçados por Lu et al. (2021) que enfatizam que o aumento da agregação do solo pode inibir a degradação da matéria orgânica, beneficiando a retenção dessa fração de carbono no solo. Neste estudo, as densidades de semeadura de capim-braquiária auxiliaram na estruturação do solo, ampliando as condições para o armazenamento e proteção do carbono nas profundidades avaliadas, fato relevante para solos com caráter arenosos e sob rotação de culturas.

A figura 4 exibe a proporção relativa entre as frações de carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (COAM) nos diferentes tratamentos avaliados. É observado que, independentemente da densidade de semeadura, a fração estável (COAM) representa a maior parcela do carbono total, variando de 88,51% (D30) a 90,73% (D10). Sabe-se que, mais da metade do carbono orgânico do solo está química ou fisicamente associado aos minerais do solo (GEORGIU et al., 2022), contribuindo com os resultados observados no presente estudo. A menor proporção de COP é registrada na densidade 10, que apresentou o maior acúmulo de COAM, sugerindo maior estabilização da matéria orgânica. Tal comportamento reforça que menores densidades de semeadura favorecem a retenção do carbono em formas mais estáveis, contribuindo para o sequestro de C em solos arenosos.

Figura 4 – Distribuição da fração lábil (COP) e estável (COAM) nos tratamentos avaliados na profundidade de 0-40 cm.



De forma geral, todos os tratamentos apresentaram comportamento similar em relação a distribuição, o que se considera esperado, especialmente pelo curto prazo adotado na cobertura de capim-braquiária com a cana-de-açúcar. Esses resultados estão de acordo com os relatos por Figueiredo, Resck e Carneiro (2010), que sugerem que as frações estáveis são menos sensíveis a práticas de manejo em curto prazo. Os autores reforçam que a preservação destas frações é fundamental para o acúmulo e manutenção de carbono em períodos maiores.

4.4 Correlação de Pearson (r)

A correlação de Pearson (Figura 5) possibilitou identificar relações significativas entre as frações de C e os atributos físico-químicos do solo, ressaltando a relevância das frações lábeis e estáveis na dinâmica do C. A classificação das correlações obtidas entre as variáveis analisadas foi feita seguindo a Tabela 10 proposta por Callegari-Jacques (2009).

Figura 5 – Correlação de Pearson (r) entre os atributos analisados.

-	Ds	Dp	Pt	pH	P	Na	Ca	Mg	K	Al	Acidez	COT	COP	COAM	Est COT	Est COP	Est COAM
Ds	1,00																
Dp	0,25	1,00															
Pt	-0,76	-0,05	1,00														
pH	0,03	0,36	-0,21	1,00													
P	-0,22	-0,40	0,15	-0,49	1,00												
Na	-0,02	-0,28	0,05	-0,30	0,45	1,00											
Ca	0,01	-0,41	0,11	0,25	0,19	0,02	1,00										
Mg	-0,23	-0,13	0,06	-0,37	0,44	0,43	-0,04	1,00									
K	0,18	-0,13	0,38	-0,34	0,53	0,35	0,30	0,34	1,00								
Al	0,38	-0,45	0,21	-0,69	0,36	0,46	-0,31	0,31	0,46	1,00							
Acidez	0,41	-0,67	0,24	-0,61	0,53	0,51	0,04	0,45	0,65	0,81	1,00						
COT	-0,16	-0,61	0,32	-0,34	0,34	0,48	0,16	0,22	0,70	0,68	0,70	1,00					
COP	0,11	-0,60	0,47	-0,50	0,41	0,48	0,30	0,31	0,68	0,52	0,61	0,67	1,00				
COAM	0,22	-0,56	0,31	-0,36	0,39	0,54	0,11	0,26	0,67	0,68	0,70	1,00	0,61	1,00			
Est COT	0,05	-0,18	0,04	-0,13	0,13	0,24	0,06	0,10	0,36	0,27	0,33	0,41	0,27	0,40	1,00		
Est COP	-0,10	-0,34	0,06	-0,18	0,22	0,35	0,30	0,08	0,41	0,20	0,24	0,27	0,52	0,27	0,60	1,00	
Est COAM	-0,23	-0,32	0,06	-0,25	0,34	0,32	0,12	0,16	0,53	0,36	0,38	0,53	0,35	0,53	0,84	0,68	1,00

Tabela 10 – Valores para classificação da correlação de Pearson (r).

Classificação	r
Fraca	$0 < r < 0,30$
Moderada	$0,30 < r < 0,60$
Forte	$0,60 < r < 0,90$
Muito Forte	$0,90 < r < 1,00$

Fonte: Callegari-Jacques (2009).

Em relação aos atributos físicos, vale destacar a forte correlação negativa ($r = -0,76$) entre a Ds e a Pt, sugerindo que o aumento da compactação resulta na redução do volume de poros no solo. Isso ocorre, pois, a elevação da densidade implica em maior adensamento de partículas, reduzindo os espaços vazios e comprometendo o funcionamento do solo. Tal comportamento pode ter associação aos 40 anos de cultivo convencional de cana-de-açúcar adotado na área experimental, que intensificam a compactação do solo no decorrer do tempo, principalmente na ausência de práticas conservacionistas. Esse histórico de manejo pode ter contribuído para os maiores valores médios de densidade do solo (Ds) observados no tratamento D0, refletindo diretamente na redução da porosidade total (Pt) neste mesmo tratamento, conforme visto na Tabela 5. Segundo Yang et al. (2021) o cultivo convencional de longo prazo promove alterações estruturais no solo, podendo interferir no crescimento radicular, na infiltração de água e aeração do solo, fatores fundamentais para o adequado funcionamento do sistema.

A correlação moderada entre o pH e o COT ($r = -0,34$) observada no presente estudo sugere que a preservação do carbono orgânico no solo tende a ser favorecida em ambientes mais ácidos. Fato que pode estar relacionado à menor atividade microbiana em condições ácidas, o que reduz a taxa de decomposição da matéria orgânica. Estes resultados assemelham-se aos observados por Liu et al. (2024) que encontraram correlação moderada entre o pH e a matéria orgânica ($r = -0,40$), reforçando que em ambientes com caráter ácido (pH baixo) favorecem a preservação da matéria orgânica, refletindo no acúmulo do COT.

Outros componentes que apresentaram forte correlação negativa ($r = -0,69$) foram o pH e o Al^{3+} , indicando que em condições de maior acidez (pH baixo) pode haver maior disponibilidade de Al^{3+} na solução do solo, fato observado na densidade 50 (Tabela 3), principalmente, ocasionando uma elevação relativa do pH em profundidade (10-40 cm) e diminuindo os teores de Al^{3+} no solo nestas camadas mencionadas. Fato também observado nos estudos de Lopes et al. (2017) que analisaram a correlação de Pearson nesses atributos químicos

em um solo arenoso manejado com cana-de-açúcar e obtiveram forte correlação negativa ($r = -0,64$).

Foi observada uma correlação forte entre o potássio trocável (K^+) e a acidez potencial com o COT, ambas com $r = 0,70$. Esses resultados indicam que, nesta área de estudo, teores mais elevados de COT possuem associação à maior retenção de K^+ no solo e a uma maior acidez potencial. Conforme salientado por Fujii et al. (2017), solos arenosos são suscetíveis à acidificação devido aos reduzidos estoques de matéria orgânica e baixa capacidade tampão. Os resultados encontrados no presente estudo estão de acordo com os observados por Moraes, Melo e Tavares Filho (2023) em pesquisas com cana-de-açúcar em solo arenoso, que obtiveram correlações fortes de K^+ ($r = 0,88$) e acidez ($r = 0,61$) com o COT.

Observou-se correlação muito forte (1,0) entre o COT e o COAM, indicando que variações no COT refletem em variações proporcionais no COAM. Esse comportamento pode indicar que a maior parte da matéria orgânica do solo está na forma estável, associada à fração mineral. Essa tendência também foi vista ao analisar os estoques, onde COT e COAM apresentaram forte correlação ($r = 0,84$). Esses resultados reforçam que o acúmulo de carbono no solo está intrinsecamente relacionado à maior estabilização da matéria orgânica. Georgiou et al. (2022) reforçam que uma elevada porcentagem do COT está química ou fisicamente associada aos minerais do solo, fato que corrobora com os resultados observados nesse estudo ao levarmos em consideração às fortes correlações obtidas.

4.5 Índices de agregação do solo e análise das classes de macroagregados

4.5.1 Diâmetro médio geométrico, Diâmetro médio ponderado e Índice de estabilidade de agregados

A tabela 11 exibe o diâmetro médio geométrico (DMG), ponderado (DMP) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) nos tratamentos avaliados. Para o DMG, observou-se significância estatística ($p < 0,05$) avaliando o efeito da densidade de semeadura e profundidade estudada.

Ao avaliar o efeito da densidade de semeadura, verificou-se que o tratamento D30 apresentou o maior valor médio na profundidade P3, com diferença estatisticamente significativo. O referido valor foi até 117,9% superior em relação aos demais tratamentos nesta camada, evidenciando o efeito positivo desta densidade intermediária de semeadura na estabilidade dos agregados do solo em profundidades maiores. É observado que o tratamento sem adição de capim-braquiária apresentou o menor valor médio observado nesta profundidade

avaliada, sendo até 54,1% inferior em comparação aos tratamentos com adição de capim-braquiária, o que sugere uma menor estabilidade estrutural dos agregados nessa condição.

Avaliando o efeito da profundidade, observou-se que as densidades D0 e D50 exibiram os menores valores de DMG na profundidade de 20-40 cm, sendo 57,3% (D0) e 50,3% (D50) menores em relação às profundidades mais superficiais do solo. Esse comportamento pode estar associado à ausência de um sistema radicular diversificado, comprometendo a formação de agregados mais estáveis. Fato que está alinhado com a menor porosidade total observada em D0 e D50 (Tabela 5), sugerindo uma possível limitação no processo de agregação do solo.

Tabela 11 – Diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade de agregados nos tratamentos avaliados.

Profundidade (cm)	Densidade de Semeadura (kg ha ⁻¹)			
	D0	D10	D30	D50
DMG (mm)				
0-10	1,57 ^{±0} Aa	1,57 ^{±0} Aa	1,47 ^{±0,16} Aa	1,57 ^{±0} Aa
10-20	1,57 ^{±0} Aa	1,57 ^{±0} Aa	1,57 ^{±0} Aa	1,57 ^{±0} Aa
20-40	0,67 ^{±0,2} Bb	1,14 ^{±0,1} ABa	1,46 ^{±0,2} Aa	0,78 ^{±0,2} Bb
DMP (mm)				
0-10	7,89 ^{±0,4} ABa	5,09 ^{±0,7} Ba	6,97 ^{±3,3} ABab	9,99 ^{±4,2} Aa
10-20	4,91 ^{±1,85} Bab	6,15 ^{±2,7} Ba	10,43 ^{±3,0} Aa	8,06 ^{±2,5} ABa
20-40	3,65 ^{±2,0} Ab	2,56 ^{±1,1} Aa	5,70 ^{±2,5} Ab	2,28 ^{±1,2} Ab
IEA (%)				
0-10	89,49 ^{±1,2} Aa	85,61 ^{±3,3} Aa	86,72 ^{±2,8} Aa	86,11 ^{±0,8} Aab
10-20	88,89 ^{±2,7} Aa	88,28 ^{±5,0} Aa	91,46 ^{±4,2} Aa	90,45 ^{±4,7} Aa
20-40	80,64 ^{±5,4} Aa	80,50 ^{±7,0} Aa	85,05 ^{±6,5} Aa	75,89 ^{±2,3} Ab

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em linha e minúscula em coluna não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

Estudos conduzidos em sistemas de monocultivo apontam uma diminuição do DMG em profundidade, conforme observado por Wendling et al. (2005). Os referidos autores avaliaram o carbono orgânico e a estabilidade de agregados em diferentes sistemas de manejo e concluíram que o plantio direto promove maiores índices de agregação em comparação ao preparo convencional, principalmente por ser um sistema conservacionista que auxilia no incremento de matéria orgânica ao solo, assemelhando-se ao sistema com uso de plantas de cobertura. Os resultados obtidos no presente estudo (Tabela 11) para o atributo DMG mostram comportamento semelhante ao relatado, destacando o tratamento sem adição de capim-braquiária (D0), que exibiu os menores valores desse atributo quando comparado às densidades de semeadura na profundidade P3.

Em contrapartida, Medeiros et al. (2018), ao avaliarem o carbono orgânico e a estabilidade de agregados em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, observaram um comportamento distinto, com menores valores de DMG já na camada de 10-20 cm em áreas sob monocultivo de cana-de-açúcar. Os autores ressaltam que o manejo convencional favorece a fragmentação dos agregados, e que o baixo teor de argila contribui para a perda da proteção física da matéria orgânica, afetando negativamente a formação e estabilidade dos agregados do solo.

A análise estatística demonstrou que houve influência da densidade de semeadura de capim-braquiária e profundidade em relação ao DMP ($p < 0,05$). Ao observarmos o efeito da densidade de semeadura, a profundidade P2 com a densidade de 30 kg ha⁻¹ exibiu o maior valor médio, sendo até 112,42% superior em relação a D0 e 69,6% maior em comparação as demais densidades de semeadura do capim-braquiária. Considerando o efeito da profundidade, a densidade D50 exibiu os maiores valores médios nas camadas mais superficiais do solo, com incremento de até 338,16% superior em relação a P3, indicando elevada concentração de agregados maiores em superfície. Esses resultados destacam que a densidade de semeadura com 30 kg ha⁻¹ foi o tratamento mais eficiente como uso de cobertura para promover a agregação na profundidade de 10-20 cm (P2), enquanto a densidade de 50 kg ha⁻¹ teve maior influência nas camadas superficiais, indicando que diferentes densidades de semeadura podem afetar de forma distinta a distribuição e a estabilidade dos agregados ao longo do perfil do solo.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) exibiu significância estatística ($p < 0,05$) avaliando o efeito isolado da profundidade. O maior valor foi observado na profundidade P2 sob a densidade de semeadura com 50 kg ha⁻¹, sugerindo uma maior estabilidade nessas condições. Essa estruturação também foi observada por Souza et al. (2021) em uma topossequência com cultivo de cana-de-açúcar, refletindo a influência das gramíneas na estabilidade de agregados do solo.

Brandão e Silva (2012) ao avaliarem a formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho até 20 cm de profundidade, com teor de areia em torno de 358 g kg⁻¹, observaram aumentos significativos no diâmetro médio ponderado (DMP) e no índice de estabilidade de agregados (IEA) com a presença dessa gramínea. Embora o solo analisado na pesquisa citada seja dissemelhante da área experimental da Usina Giasa, e não tenha sido avaliado o manejo com diferentes densidades de semeadura, os autores demonstraram que a presença do capim-braquiária exerce efeito positivo na estabilidade do solo. Estes resultados respaldam os resultados obtidos neste estudo, visto que, densidades específicas de semeadura (D10 e D50) promoveram incrementos nos referidos

atributos mencionados acima, sugerindo que não apenas a presença, como também a densidade de semeadura reflete na formação e manutenção de agregados estáveis. Tais informações são ainda mais relevantes ao destacar o solo de caráter arenoso presente na área de estudo.

De forma geral, os atributos físicos estudados – diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), apresentaram comportamentos semelhantes na maioria dos tratamentos analisados, sugerindo um possível efeito cumulativo da aplicação contínua de vinhaça ao longo de mais de 20 anos na área experimental. Esses resultados são corroborados com os de Vicente et al. (2012), que ao avaliarem a estabilidade de agregados em sistemas de produção de cana-de-açúcar com e sem aplicação de vinhaça, constataram que o manejo desse subproduto contribui significativamente para a preservação de agregados estáveis, mesmo em áreas com menor período de aplicação (4 anos). Esses resultados reforçam que a vinhaça é um fator adicional que pode potencializar a estruturação do solo, juntamente com as densidades de capim-braquiária, auxiliando na manutenção da qualidade física, principalmente em ambientes com histórico de manejo intensivo como o monocultivo de cana-de-açúcar.

4.5.2 Massa proporcional de agregados (MPA), Massa da classe de agregados (MCA), Porcentagem, Estoque de C e COP nas classes de macroagregados

Houve diferença estatística significativa ($p < 0,05$) para a variável MPA em todas as classes de macroagregados avaliadas, conforme observado na Tabela 12.

Para a classe de macroagregados extragrandes (8-19 mm), verificou-se que as densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária exibiram as maiores porcentagens em todas as profundidades estudadas. Na camada P1, os valores médios foram até 197% (D10) e 153,7% (D30) superiores ao tratamento sem adição de capim-braquiária como cobertura (D0). Na camada P2, o tratamento D30 apresenta valores de MPA até 248,5% maior em relação a D0. Enquanto que, em profundidades maiores (20-40 cm) as densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹ foram até 308,6 e 291,4% superiores, respectivamente, em relação aos demais tratamentos. Esses resultados sugerem uma possível relação do sistema radicular da cultura que atua na agregação de partículas do solo, através da liberação de exsudados e aporte de resíduos orgânicos, especialmente através de densidades menores e intermediárias de semeadura do capim-braquiária.

Na profundidade P1, observou-se predominância da classe de macroagregados grandes (2-8 mm) no tratamento D10, que representou 16,4% dos macragregados dessa classe. Esse resultado reflete a influência do uso de menores densidades de semeadura do capim-braquiária

na formação de agregados estáveis, sugerindo que menores aportes de biomassa radicular podem induzir a estabilidade do solo em camadas superficiais.

Na profundidade P2, a referida classe de macroagregados apresentou as maiores porcentagens no tratamento D0, resultado possivelmente influenciado pelo histórico de cultivo convencional da área. Esse manejo, baseado no uso contínuo de monocultivo, tende a promover a fragmentação de agregados maiores, o que pode explicar a predominância dessa classe no solo sob ausência de uso do capim-braquiária como planta de cobertura.

Para a classe de macroagregados pequenos (0,25-2 mm), foi observado diferença estatística significativa ($p > 0,05$) entre as densidades de semeadura avaliadas. Na camada mais superficial (0-10) destacou-se a densidade D10 que apresentou os maiores percentuais médios, enquanto que na profundidade de 20-40 cm, o tratamento D50 exibiu os maiores valores. Esse resultado reflete a influência de diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária na formação de agregados menores do solo em distintas profundidades.

Na camada mais superficial (0-10 cm), destacou-se a densidade D10, que apresentou os maiores percentuais médios, enquanto na profundidade de 20-40 cm o tratamento D50 registrou os maiores valores. Esses resultados evidenciam a influência das diferentes densidades de semeadura do capim-braquiária na formação de agregados menores, modulando a agregação do solo de acordo com a profundidade. Para a profundidade P2 não foi observado diferença estatisticamente significativa, fato que pode estar relacionado às características do solo arenoso da área de estudo, limitando a estabilidade em profundidades específicas.

Tabela 12 – Massa proporcional de agregados nas densidades de semeadura de capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de semeadura (kg ha ⁻¹)	Macroagregados		
		(8-19 mm)	(2-8 mm)	(0,25-2 mm)
		(%)	(%)	(%)
0-10	D0	20,1 ^{±1,2} b	7,0 ^{±0,7} c	12,5 ^{±3,1} b
	D10	59,7 ^{±4,3} a	16,4 ^{±0,5} a	22,4 ^{±1,1} a
	D30	51,0 ^{±8,5} a	12,0 ^{±1,0} b	20,8 ^{±4,5} ab
	D50	38,0 ^{±6,0} ab	4,0 ^{±0,2} c	20,0 ^{±5,9} ab
10-20	D0	19,6 ^{±3,6} b	27,0 ^{±2,2} a	39,9 ^{±3,4} a
	D10	47,6 ^{±5,4} ab	15,4 ^{±2,0} ab	34,8 ^{±4,2} a
	D30	68,3 ^{±6,5} a	7,0 ^{±1,6} b	24,6 ^{±4,3} a
	D50	31,2 ^{±5,8} ab	14,2 ^{±2,1} ab	30,4 ^{±3,7} a
20-40	D0	12,4 ^{±1,2} b	17,0 ^{±0,8} a	28,2 ^{±3,2} c
	D10	38,0 ^{±3,2} a	6,8 ^{±0,6} b	52,4 ^{±0,8} ab
	D30	36,4 ^{±4,1} a	6,1 ^{±0,7} b	40,0 ^{±3,7} bc
	D50	9,3 ^{±1,7} b	3,2 ^{±0,6} b	69,1 ^{±1,6} a

Médias seguidas pela mesma letra em coluna nas diferentes profundidades não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

No mais, essa redução de macroagregados extragrandes e grandes em profundidade pode ter associação ao monocultivo de cana-de-açúcar adotado pela usina nos últimos 40 anos, fragmentando os agregados e ocasionando menores percentuais nas referidas classes. Outro fator que pode ter relação à baixa formação de macroagregados grandes na profundidade de 20-40 cm é o curto período de cultivo do capim-braquiária como planta de cobertura, o que pode não ter sido suficiente para promover efeitos expressivos na estrutura do solo para a referida profundidade.

No mais, essa fragmentação pode comprometer diferentes funções no solo, visto que os macroagregados são estruturas fundamentais para a estabilidade física, armazenagem de carbono e são mais suscetíveis ao impacto de manejos intensivos (HUANG et al., 2024). Nessa perspectiva, a redução dos macroagregados extragrandes observada neste estudo indica uma menor estabilidade estrutural do solo, comprometendo, possivelmente, a conservação do carbono e de nutrientes, além da porosidade, retenção de água e a resistência a erosão. Em estudos com sistemas convencionais e plantio direto, Briedis et al. (2023) observaram uma redução de macroagregados grandes na área com cultivo convencional, refletindo a importância do aporte vegetal na construção da qualidade estrutural do solo, especialmente dos que apresentam caráter arenoso.

Para a porcentagem de C nos macroagregados houve diferença estatística significativa ($p < 0,05$) conforme visto na Tabela 13. Nas profundidades P2 e P3, a densidade D30 destacou-

se por exibir os maiores percentuais de C na classe extragrande, refletindo o efeito positivo dessa densidade de semeadura na acumulação de C em agregados mais estáveis nas camadas subsuperficiais. A ausência de significância estatística na camada mais superficial (0-10 cm), possivelmente está relacionada ao caráter arenoso do solo (Tabela 4), que por apresentar baixa capacidade de proteção física da matéria orgânica, pode dificultar a permanência desse elemento nesta camada estudada.

Tabela 13 – Porcentagem de C nas densidades de semeadura de capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de semeadura (kg ha ⁻¹)	Macroagregados		
		(8-19 mm)	(2-8 mm)	(0,25-2 mm)
		(%)		
0-10	D0	30,68 a	7,47 b	16,83 a
	D10	52,77 a	33,47 a	35,85 a
	D30	75,38 a	17,43 ab	37,62 a
	D50	44,95 a	9,89 b	14,73 a
10-20	D0	20,35 b	35,90 a	43,75 a
	D10	58,80 ab	27,69 a	33,14 ab
	D30	72,05 a	10,86 a	17,09 ab
	D50	39,18 ab	29,01 a	12,20 b
20-40	D0	6,09 b	26,30 a	26,59 a
	D10	47,12 ab	20,04 a	73,86 a
	D30	52,13 a	18,61 a	29,27 a
	D50	37,05 ab	33,70 a	29,26 a

Médias seguidas pela mesma letra em coluna nas diferentes profundidades não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

A tabela 14 exibe a massa da classe de agregado (MCA), atributo que representa a quantidade de solo existente em cada classe de macroagregado, considerando a fração de carbono em sua determinação. Observa-se que houve diferença estatística significativa ($p < 0,05$) para esse atributo. Na classe extragrande, a densidade de semeadura com 30 kg ha⁻¹ apresentou os maiores valores médios nas profundidades P2 e P3, indicando maior capacidade de retenção de C em agregados mais estáveis. Na classe grande, o efeito da densidade de semeadura ocorreu apenas da profundidade de 0-10 cm, com o tratamento D10 apresentou os maiores valores médios. Esse resultado indica que densidades menores de semeadura do capim-braquiária podem favorecer a formação de macroagregados nessa classe em superfície, possivelmente em decorrência de uma menor competição entre plantas, o que proporciona maior desenvolvimento radicular e elevado aporte de resíduos orgânicos.

Para a classe pequena, apenas a profundidade de P2 exibiu efeito estatístico significativo, com o tratamento D0 apresentando o maior valor médio e sendo, estatisticamente,

semelhante as densidades de semeadura D10 e D30. Em determinadas condições, observa-se que a ausência de cobertura vegetal (D0) não compromete a formação de agregados menores, possivelmente refletindo o efeito do histórico de manejo convencional da área. No mais, a similaridade estatística entre D10 e D30 sugerem que a presença da cobertura vegetal pode amenizar o efeito, contribuindo para uma distribuição mais equilibrada das classes de agregados.

Tabela 14 – Massa da classe de agregados nas densidades de semeadura de capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de semeadura (kg ha ⁻¹)	Macroagregados		
		(8-19 mm)	(2-8 mm)	(0,25-2 mm)
		(Mg ha ⁻¹)		
0-10	D0	429,49 a	104,58 b	235,62 a
	D10	738,73 a	468,63 a	501,88 a
	D30	1055,27 a	244,01 ab	526,69 a
	D50	629,30 a	138,48 b	206,24 a
10-20	D0	280,88 b	495,38 a	603,74 a
	D10	811,42 ab	382,07 a	457,31 ab
	D30	994,28 a	149,92 a	235,80 ab
	D50	540,63 ab	400,29 a	168,30 b
20-40	D0	179,12 b	773,19 a	781,62 a
	D10	1385,20 ab	589,26 a	2171,62 a
	D30	1532,51 a	547,07 a	860,42 a
	D50	1089,20 ab	990,67 a	860,12 a

Médias seguidas pela mesma letra em coluna nas diferentes profundidades não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

De Oliveira Ferreira et al. (2018) ao avaliarem a macroagregação e restauração do carbono orgânico do solo em Latossolos com teores de areia entre 508 e 667 g kg⁻¹, observaram variações na massa da classe de agregados (MCA) entre 567,17 a 671,87 Mg ha⁻¹ para a classe extragrande (8-19 mm) até a profundidade de 20 cm, o que se aproxima dos resultados obtidos no presente estudo, reafirmando a semelhança de comportamento em solos de classe textural arenosa sob práticas de manejo conservacionista.

Estes resultados também são próximos aos relatados por Nath e Lal (2017), que ao avaliarem os efeitos das práticas de cultivo e manejo do solo sobre os agregados e o carbono do solo, constataram que o sistema plantio direto no cultivo de milho (gramínea) obteve maior agregação e maior teor de carbono orgânico dentro dos agregados. De forma similar, é observado neste estudo que densidades de semeadura, especialmente com 10 e 30 kg ha⁻¹, favorecem a formação de macroagregados maiores e o acúmulo de carbono orgânico total, ressaltando o papel das gramíneas na melhoria da estrutura do solo em ambiente arenoso.

Para os estoques de carbono orgânico total (C) e carbono orgânico particulado (COP) nas classes de macroagregados houve diferença significativa ($p < 0,05$) avaliando o efeito isolado da densidade de semeadura de capim-braquiária, conforme observado Tabela 12. De forma geral, os maiores estoques das frações de carbono estiveram associados as densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹, independentemente da profundidade estudada. Esse comportamento evidencia que o manejo na densidade de semeadura do capim-braquiária exerce papel primordial não apenas no acúmulo de carbono, como também na redistribuição e estabilidade do C em diferentes profundidades e classes de macroagregados.

Na classe de macroagregados extragrandes (8-19 mm) as diferenças tornaram-se evidentes a partir da profundidade de 10 cm, com o tratamento D30 exibindo os maiores estoques de C. Considerando o acumulado dessa classe (0-40 cm) a densidade com 30 kg ha⁻¹ foi até 263,43% superior em relação aos demais tratamentos. Esse acúmulo em profundidade pode ter associação à maior penetração radicular e liberação de exsudados, além do aporte vegetal, que contribuem para a formação e estabilidade dos macroagregados, refletindo nesses incrementos de C nas referidas classes estudadas.

Tabela 15 – Estoque de carbono e carbono orgânico particulado nas densidades de semeadura de capim-braquiária.

Profundidade (cm)	Densidade de semeadura (kg ha ⁻¹)	Estoque de C			Estoque de COP
		(8-19 mm)	(2-8 mm)	(0,25-2 mm)	(8-19 mm)
		(Mg ha ⁻¹)			
0-10	D0	19,20 ^{±6,4} a	3,57 ^{±0,8} b	6,88 ^{±2,9} a	5,41 ^{±1,4} a
	D10	25,77 ^{±15,9} a	20,81 ^{±3,0} a	22,04 ^{±9,8} a	5,86 ^{±2,4} a
	D30	36,48 ^{±10,7} a	9,41 ^{±2,9} ab	18,79 ^{±8,7} a	6,58 ^{±1,8} a
	D50	24,12 ^{±14,2} a	4,67 ^{±0,2} b	7,21 ^{±2,6} a	5,70 ^{±1,0} a
10-20	D0	7,82 ^{±2,8} b	13,66 ^{±5,3} a	17,13 ^{±1,8} ab	4,96 ^{±2,1} ab
	D10	20,03 ^{±5,7} ab	14,62 ^{±5,0} a	17,59 ^{±5,0} a	5,67 ^{±1,4} ab
	D30	33,81 ^{±5,7} a	3,67 ^{±1,1} b	6,95 ^{±1,2} bc	6,00 ^{±1,3} a
	D50	23,45 ^{±4,7} ab	11,44 ^{±0,4} ab	4,86 ^{±1,8} c	3,39 ^{±1,0} b
20-40	D0	6,29 ^{±2,6} b	19,89 ^{±5,1} a	20,15 ^{±3,3} b	9,30 ^{±3,6} bc
	D10	35,82 ^{±9,0} ab	20,88 ^{±4,5} a	75,49 ^{±4,0} a	12,54 ^{±2,6} a
	D30	50,77 ^{±4,5} a	17,37 ^{±4,0} a	14,77 ^{±0,4} b	11,49 ^{±1,2} ab
	D50	30,04 ^{±9,0} ab	27,16 ^{±7,5} a	24,23 ^{±3,3} b	7,65 ^{±1,0} c
0-40	D0	33,31 ^{±0,7} b	37,12 ^{±7,7} a	44,16 ^{±4,4} b	19,67 ^{±6,6} ab
	D10	81,62 ^{±4,3} ab	56,31 ^{±14,4} a	115,12 ^{±8,8} a	24,07 ^{±3,7} a
	D30	121,06 ^{±5,3} a	30,45 ^{±13,8} a	40,51 ^{±4,1} b	24,07 ^{±2,8} a
	D50	77,61 ^{±6,7} ab	43,27 ^{±10,6} a	36,30 ^{±2,8} b	16,74 ^{±0,8} b

Médias seguidas pela mesma letra em coluna nas diferentes profundidades não diferem estatisticamente pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade ($p > 0,05$). \pm desvio padrão.

Na classe de macroagregados grandes (2-8 mm), a densidade de semeadura com 10 kg ha⁻¹ apresentou efeito estatístico significativo até os 20 cm de profundidade. Esses resultados ressaltam a influência de menores densidades de semeadura do capim-braquiária como planta de cobertura, as quais auxiliam no maior aporte de C nessa classe específica de macroagregados, favorecendo a estabilidade do solo em profundidades superficiais e intermediárias.

Para os macroagregados pequenos (0,25-2 mm) a densidade de semeadura com 10 kg ha⁻¹ apresentou os maiores estoques de carbono a partir dos primeiros 10 cm de profundidade. Destacando a influência destas densidades de semeadura no aporte de matéria orgânica e incremento de C nessas classes de macroagregados estudadas. De forma geral, mesmo em frações de menor diâmetro, o aporte radicular do capim-braquiária em densidades específicas pode estimular a agregação e o acúmulo de C em camadas mais profundas.

O estoque de carbono orgânico particulado (COP) exibiu efeito significativo ($p < 0,05$) na classe de macroagregado avaliada (8-19 mm). As densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹ destacaram-se por apresentar os maiores estoques dessa fração lábil a partir dos 10 cm de profundidade. Na camada de 10-20 cm o tratamento D30 exibiu estoque de 6,0 Mg ha⁻¹, enquanto que para profundidade de 20-40 cm o estoque foi de 12,54 Mg ha⁻¹. Avaliando o efeito acumulado, os estoques de COP foram de 24,07 Mg ha⁻¹, respectivamente, para as densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária. De forma geral, possivelmente, o sistema radicular das densidades mencionadas acima associado à liberação de exsudados e ação da microbiota do solo, atuam como agente estruturante, induzindo na formação e estabilização dos macroagregados e melhorando a qualidade estrutural do solo, bem como, o armazenamento de carbono em suas distintas frações.

Du et al. (2013) em estudos sobre a estabilidade de agregados do solo e carbono associado a agregados, concluíram que a adoção de sistemas conservacionistas, pode induzir no aumento da macroagregação do solo e no acúmulo total de C nos macroagregados, corroborando com os resultados obtidos no presente estudo. No mais, o comportamento dessas frações de carbono sugere que densidades de semeadura menores e intermediárias de capim-braquiária influenciam diretamente na forma como o carbono se distribui no solo, com concentrações mais elevadas, principalmente, nas classes maiores de macroagregados.

Estudos como o de Zhao et al. (2023) evidenciaram que o cultivo intercalar contribui para o incremento de carbono nos macroagregados do solo, processo este fortemente induzido por características do sistema radicular das culturas utilizadas. Esse mecanismo corrobora com

os resultados obtidos no presente estudo, em que densidades específicas de semeadura do capim-braquiária favorecem a manutenção de carbono nas classes de macroagregados, especialmente as de maior diâmetro. De forma complementar, Xiao et al. (2021) concluíram que a formação de macroagregados grandes é um fator determinante para o sequestro de carbono em solos, sobretudo em processos de restauração de terras agrícolas à curto prazo, cenário similar ao avaliado neste trabalho. Esses resultados reforçam o potencial uso de cobertura com capim-braquiária para a melhoria da agregação do solo e incremento nos estoques das frações de carbono, mesmo em condições edáficas limitantes.

Silva et al. (2025) avaliando 60 anos de monocultivo de cana-de-açúcar em solo de caráter arenoso, observaram que grandes macroagregados foram os principais contribuintes para o armazenamento de carbono sob cultivo mínimo – prática que reduz o revolvimento e a compactação do solo, através de práticas com menor utilização de maquinário agrícola. De forma similar, os resultados do presente estudo indicam que o uso de capim-braquiária favorece a estruturação do solo e o acúmulo de carbono em macroagregados, especialmente os extragrandes. Esses resultados reforçam que manejos conservacionistas, como o cultivo mínimo ou o uso de cobertura vegetal, são estratégias eficientes para restaurar a agregação do solo e promover o sequestro de carbono.

5 CONCLUSÕES

A distribuição de macroagregados extragrandes é maior nas camadas mais superficiais do solo (P1 e P2) nas densidades de semeadura acima de 10 kg ha⁻¹. Em profundidades maiores (P3) há predominância de macroagregados pequenos em todos os tratamentos analisados.

O uso do capim-braquiária com densidades de semeadura de 10 e 30 kg ha⁻¹ (D10 e D30) elevaram os teores e os estoques das frações de carbono no solo (COT, COP e COAM).

Na profundidade de 20-40 cm (P3) o DMG foi influenciado pelas densidades de semeadura com 10 e 30 kg ha⁻¹. O maior DMP foi obtido no tratamento D30 em P2, enquanto que a densidade D50 exibiu maior valor médio na camada P1, em relação as distintas profundidades. O IEA foi estatisticamente significativo na profundidade P2 na densidade de semeadura com 50 kg ha⁻¹.

Densidades de semeadura iguais ou superiores a 10 kg ha⁻¹ (D10 e D30) auxiliam no aumento da agregação do solo e no acúmulo de carbono orgânico total (COT) e particulado (COP) intra-agregado.

O uso de capim-braquiária como planta de cobertura no cultivo de cana-de-açúcar impacta positivamente a melhoria da agregação do solo e no acúmulo de C nas frações estudadas, em condições arenosas sob curto prazo. Densidades de semeadura entre 10 e 30 kg ha⁻¹ de capim-braquiária são recomendadas para utilização em sistemas que utilizam cobertura vegetal por exibirem melhor desempenho em relação a maioria das variáveis estudadas. No entanto, recomenda-se que estudos futuros avaliem intervalos entre essas duas densidades de semeadura, visando identificar a densidade que maximize os benefícios químicos e estruturais do solo em condições de cultivo com uso de cobertura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, N.; VIRK, A. L.; HAFEEZ, M. B.; KAN, Z. R.; SHI, Z.; WANG, R.; ... LI, J. Soil carbon mineralization and aggregate distribution in various tillage practices of rice–wheat cropping system: a field and laboratory study. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 1, p. 451-466, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01555-2>
- ALENCAR, G. V.; GOMES, L. C.; BARROS, V. M. D. S.; ORTIZ ESCOBAR, M. E.; DE OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. D. S. Organic farming improves soil carbon pools and aggregation of sandy soils in the Brazilian semi-arid region. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 3, p. e13097, 2024. <https://doi.org/10.1111/sum.13097>
- ALMEIDA, B. G. de. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, 2008.
- ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. **POROSIDADE**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Capítulo 7 Manual de Métodos de Análise de Solo. 3 ed. Revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017b. 573p.
- ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. **DENSIDADE DO SOLO**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Capítulo 7 Manual de Métodos de Análise de Solo. 3 ed. Revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017a. 573p.
- ARUNRAT, N.; KONGSURAKAN, P.; SEREENONCHAI, S.; HATANO, R. Soil organic carbon in sandy paddy fields of Northeast Thailand: A review. **Agronomy**, v. 10, n. 8, p. 1061, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081061>
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A.; ROSSI NETO, J.; ... CARVALHO, J. L. N. Untrafficked furrowed seedbed sustains soil physical quality in sugarcane mechanized fields. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 5, p. 2150-2164, 2021. <https://doi.org/10.1111/ejss.13107>
- BARBOSA, L. C.; TENELLI, S.; MAGALHÃES, P. S.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; DE LIMA, R. P.; ... CARVALHO, J. L. N. Linking soil physical quality to shoot and root biomass production in scenarios of sugarcane straw removal. **European Journal of Agronomy**, v. 152, p. 127029, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127029>
- BARRETO, R. C.; MADARI, B. E.; MADDOCK, J. E.; MACHADO, P. L.; TORRES, E.; FRANCHINI, J.; COSTA, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface depth of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 132: 243-251, 2009.
- BRANDÃO, E.; SILVA, I. F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência rural (Online)**. v. 42, n. 7, p. 1193-1199, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000700009>

BRIEDIS, C.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; FRANCHINI, J. C.; MILORI, D. M. B. P. Preservation of labile organic compounds is the pathway for carbon storage in a 23-year continuous no-till system on a Ferralsol in southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 33, p. e00643, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00643>

BUTPHU, S.; RASCHE, F.; CADISCH, G.; KAEWPRADIT, W. Eucalyptus biochar application enhances Ca uptake of upland rice, soil available P, exchangeable K, yield, and N use efficiency of sugarcane in a crop rotation system. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 183, n. 1, p. 58-68, 2020.

CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Artmed Editora, 2009.

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.

CAMPOS, D. V. B.; TEIXEIRA, P. C.; PÉREZ, D. V.; SALDANHA, M. F. C. **ACIDEZ POTENCIAL DO SOLO**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Capítulo 4 Manual de Métodos de Análise de Solo. 3 ed. Revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573p.

CAMPOS, I. A.; SILVA, E. M. R. P.; DA SILVA VICENTE, T. F.; DOS SANTOS NUNES, E. O.; DE ANDRADE, L. G. L.; ANDRADE, E. **VARIAÇÃO NOS ATRIBUTOS DE UM SOLO ARENOSO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR APÓS APLICAÇÃO DE VINHAÇA**. Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. 2021.

CANISARES, L. P.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, L. F. S.; FRANCO, A. L. C.; COOPER, M.; MOONEY, S. J.; CERRI, C. E. P. Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 2, p. 189-199, 2020. <https://doi.org/10.1111/sum.12556>

CARDIN, C. A.; SANTOS, C. H. dos; ESCARMÍNIO, M. A. Impacts of vinasse and methods of sugarcane harvesting on the availability of K and carbon stock of an Argisol. *Revista Ceres*, v. 63, n. 1, p. 95-102, 2016. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010013>

CASTRO FILHO, C. D.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>

CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon

stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 23-28, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01315.x>

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; CASTIONI, G. A.; GUIMARAES, E. M.; LISBOA, I. P.; MORAES, L. A.; ... CARVALHO, J. L. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 163, p. 113315, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>

CHUWONGPANICH, W.; FUJII, K.; INAGAKI, Y.; HAYAKAWA, C.; CHITTAMART, N. Effects of sugarcane substrate inputs on microbial biomass and nitrogen availability in tropical sandy soils of northeast Thailand. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 2, p. 130-138, 2021. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1870095>

CORDEIRO, C. F. S.; RODRIGUES, D. R.; ROCHA, C. H.; ARAUJO, F. F.; ECHER, F. R. Glomalin and microbial activity affected by cover crops and nitrogen management in sandy soil with cotton cultivation. **Applied Soil Ecology**, v. 167, p. 104026, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104026>

CORDEIRO, C. F. D. S.; RODRIGUES, D. R.; SILVA, G. F. D.; ECHER, F. R.; CALONEGO, J. C. Soil organic carbon stock is improved by cover crops in a tropical sandy soil. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1546-1556, 2022. <https://doi.org/10.1002/agj2.21019>

CORREA, J.; POSTMA, J. A.; WATT, M.; WOJCIECHOWSKI, T. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of experimental botany**, v. 70, n. 21, p. 6019-6034, 2019. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz383>

COTO ARBELO, O.; SANDHU, H.; MOMOTAZ, A.; DAVIDSON, W.; SANDOYA, G.; BALTAZAR, M.; ... LABORDE, C. Selection via cane yield and ratooning ability of sugarcane genotypes in sandy soils in Florida. **Sugar Tech**, v. 23, n. 5, p. 986-998, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00973-9>

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de Pedras de Fogo, estado da Paraíba**. Organizado: João da Costa Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Júnior. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/16247/1/Rel_Pedras_Fogo.pdf. Acesso em 18 de fevereiro 2025.

DE CASTRO, S. A. Q.; OTTO, R.; SÁNCHEZ, C. E. B.; TENELLI, S.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Sugarcane straw preservation results in limited immobilization and improves crop N-fertilizer recovery. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105889, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105889>

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; BARTH, G.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. P.; ... DA SILVA, W. R. Why no-till system sequesters more

carbon and is more resilient and productive with contrasting fertilization regimes in a highly weathered soil?. **Soil and Tillage Research**, v. 244, p. 106179, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106179>

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; BARTH, G.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. P.; ... DA SILVA, W. R. Why no-till system sequesters more carbon and is more resilient and productive with contrasting fertilization regimes in a highly weathered soil?. **Soil and Tillage Research**, v. 244, p. 106179, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106179>

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; JORGE CARNEIRO AMADO, T.; MASSAO INAGAKI, T.; BRIEDIS, C.; TIVET, F. Can no-till restore soil organic carbon to levels under natural vegetation in a subtropical and tropical Typic Quartzipisamment?. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 4, p. 1742-1750, 2021.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3822>

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; TIVET, F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; ... ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 1559-1567, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.072>

DE SOUZA PADILHA, N.; CECCON, G.; ALVES, V. B.; NETO, A. L. N.; DA SILVA, J. F.; MAKINO, P. A. Soybean yield in succession to single and intercropping corn and brachiaria and submitted to different irrigation intervals. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 29, n. Contínua, p. 66-80, 2021.
<https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.11225>

D'AMICO-DAMIÃO, V.; BARROSO, A. A. M.; ALVES, P. L. D. C. A.; LEMOS, L. B. Intercropping maize and succession crops alters the weed community in common bean under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e65244, 2021.
<https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5065244>

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G.; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. **ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Capítulo 10 Manual de Métodos de Análise de Solo. 3 ed. Revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573p.

DO PRADO PAIM, T.; DE CARVALHO, V. P.; SILVA, M. D.; SOUZA, B. R.; LEITE, L. B. S.; JÚNIOR, G. C.; ALVES, E. M. DENSIDADE DE SEMEADURA DE DIFERENTES ESPÉCIES FORRAGEIRAS. **Informe Goiano** (ISSN 2525-6866), 2021.

DOS REIS FERREIRA, C.; DA SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; DO NASCIMENTO GUEDES, J.; ROSSET, J. S.; DOS ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil and Tillage Research**, v. 198, p. 104533, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104533>

DU, Z. L.; REN, T. S.; HU, C. S.; ZHANG, Q. Z.; BLANCO-CANQUI, H. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different tillage systems in the North China

Plain. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 2114-2123, 2013.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60428-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60428-1)

E-SA, W.; PHIWDAENG, N.; POLPINIT, P.; KAEWPRADIT, W. Green Cane Harvest Impact on Sugarcane Nutrients Proportion and Uptake under Clay Loam and Sandy Soil Conditions in Thailand. **Sugar Tech**, p. 1-12, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01497-8>

ESTEBAN, D. A. A.; DE SOUZA, Z. M.; DA SILVA, R. B.; DE SOUZA LIMA, E.; LOVERA, L. H.; DE OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v. 362, p. 114097, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>

ESTEBAN, D. A. A.; DE SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; DOS SANTOS GOMES, M. G.; PARRA, J. A. S.; JÚNNYOR, W. D. S. G.; DE MORAES, M. T. Risk assessment of soil compaction due to machinery traffic used in infield transportation of sugarcane during mechanized harvesting. **Soil and Tillage Research**, v. 244, p. 106206, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106206>

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations** – FAOSTat, Land Use data, 2022. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL/>>. Acesso em 27 de dezembro 2024.

FARNI, Y.; SUNTARI, R.; PRIJONO, S. Utilization of Tithonia diversifolia and sugarcane leaves to improve soil properties and plant growth on a sandy soil of Malang, East Java. **Journal of Degraded and Mining Lands Management**, Malang, Indonesia, v. 9, n. 2, p. 3227–3236, 2022. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2022.092.3227>

FERRAZ-ALMEIDA, R.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; CAMARGO, R.; LEMES, E. M.; SOARES DE FARIA, R.; QUINTÃO LANA, R. M. Sorghum–grass intercropping systems under varying planting densities in a semi-arid region: Focusing on soil carbon and grain yield in the conservation systems. **Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 1762, 2022.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111762>

FERREIRA, A. C. D. B.; BOGIANI, J. C.; SOFATTI, V.; BORIN, A. L. D. C.; PERINA, F. J.; FERREIRA, G. B.; ... MACHADO, P. L. O. D. A. Organic carbon stock changes and crop yield in a tropical sandy soil under rainfed grains-cotton farming systems in Bahia, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, p. e71219, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5271219>

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FIGUEIREDO, C. C. D.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 907-916, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300032>

FREITAS, M. A.; SILVA, D. V.; PEREIRA, G. A.; SOUZA, W. M.; NUNES, J. J.; SILVA, A. A. Physiological characteristics of corn intercropped with different arrangements of

palisade grass plants. **Advances in Weed Science**, v. 39, p. e021230847, 2021.
<https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2021;39:00002>

FUJII, K.; HAYAKAWA, C.; PANITKASATE, T.; MASKHAO, I.; FUNAKAWA, S.; KOSAKI, T.; NAWATA, E. Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 80-87, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.008>

GALDOS, M. V.; BROWN, E.; ROSOLEM, C. A.; PIRES, L. F.; HALLETT, P. D.; MOONEY, S. J. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 5072, 2020.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61986-0>

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1724-1731, 2013. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0310>

GAZOLA, B.; MARIANO, E.; ANDRADE, M. G.; COSTA, V. E.; ROSOLEM, C. A. Fate of fertilizer N applied to maize intercropped with forage grass and recovery of residual N by soybean in a double cropping system. **Plant and Soil**, v. 496, n. 1, p. 205-219, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s11104-023-06139-8>

GEE, G. W.; OR, D. **Particle-size analysis**. In: DANE, J. H. Methods of soil analysis. 3 ed. Madison: Soil Science Society of America, cap. 4: Physical methods, p. 255-293, 2002.
 GEETHA, P.; TAYADE, A. S.; CHANDRASEKAR, C. A.; SELVAN, T.; KUMAR, R. Agronomic response, weed smothering efficiency and economic feasibility of sugarcane and legume intercropping system in tropical India. **Sugar Tech**, v. 21, p. 838-842, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s12355-018-0689-9>

GEORGIU, K.; JACKSON, R. B.; VINDUŠKOVÁ, O.; ABRAMOFF, R. Z.; AHLSTRÖM, A.; FENG, W.; ... TORN, M. S. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 3797, 2022.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>

GUO, Z.; HAN, J.; LI, J. Response of organic carbon mineralization and bacterial communities to soft rock additions in sandy soils. **PeerJ**, v. 8, p. e8948, 2020.
<https://doi.org/10.7717/peerj.8948>

HOK, L.; DE MORAES SÁ, J. C.; BOULAKIA, S.; REYES, M.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; TIVET, F. E.; ... LENG, V. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon based on diversity and high biomass-C input under conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. **Catena**, v. 198, p. 105065, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105065>

HU, L.; HUANG, R.; DENG, H.; LI, K.; PENG, J.; ZHOU, L.; OU, H. Effects of Different Intercropping Methods on Soil Organic Carbon and Aggregate Stability in Sugarcane Field. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 31, n. 4, 2022.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, v. 208, p. 103295, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

HUANG, J.; KHAN, M. T.; PERECIN, D.; COELHO, S. T.; ZHANG, M. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 133, p. 110296, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110296>

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal 2023**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em:
 <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/pedras-de-fogo/pesquisa/14/10193>>. Acesso em 28 de dezembro 2024.

JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; CAVALCANTI, R. Q.; SILVA, Ê. F.; PEDROSA, E. M. Soil physical indicators of a sugarcane field subjected to successive mechanised harvests. **Sugar Tech**, v. 23, p. 811-818, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00916-w>

JOHN, K.; ABRAHAM ISONG, I.; MICHAEL KEBONYE, N.; OKON AYITO, E.; CHAPMAN AGYEMAN, P.; MARCUS AFU, S. Using machine learning algorithms to estimate soil organic carbon variability with environmental variables and soil nutrient indicators in an alluvial soil. **Land**, v. 9, n. 12, p. 487, 2020.
<https://doi.org/10.3390/land9120487>

KAN, Z. R.; LIU, W. X.; LIU, W. S.; LAL, R.; DANG, Y. P.; ZHAO, X.; ZHANG, H. L. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective. **Global Change Biology**, v. 28, n. 3, p. 693-710, 2022.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15968>

KICHAMU-WACHIRA, E.; BAI, Y.; XU, Z.; REARDON-SMITH, K.; LIU, H.; BIGGS, D. Beyond conventional farming: exploring the benefits of planting basins with manure on soil quality as reflected in labile organic carbon and nitrogen indicators in Kenya. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, n. 1, p. 402-413, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03651-3>

KOPPEN, W. **Climatología con un estudio de los climas de la tierra**. México Fondo de Cultura Económica, 1948.

KRAUSE, H. M.; STEHLE, B.; MAYER, J.; MAYER, M.; STEFFENS, M.; MÄDER, P.; FLIESSBACH, A. Biological soil quality and soil organic carbon change in biodynamic, organic, and conventional farming systems after 42 years. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 6, p. 117, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00843-y>

KUMAR, N.; SOW, S.; RANA, L.; KUMAR, V.; KUMAR, J.; PRAMANICK, B.; ... HOSSAIN, A. Productivity, water use efficiency and soil properties of sugarcane as influenced by trash mulching and irrigation regimes under different planting systems in sandy loam soils. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, p. 1340551, 2024.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1340551>

LAL, R. Carbon farming by recarbonization of agroecosystems. **Pedosphere**, v. 33, n. 5, p. 676-679, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.07.024>

LAL, R. Soil management for carbon sequestration. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 38, n. 3, p. 231-237, 2021. <https://doi.org/10.1080/02571862.2021.1891474>

LAL, R. Soil organic matter content and crop yield. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 75, n. 2, p. 27A-32A, 2020. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A>

LIPIEC, J.; USOWICZ, B.; KŁOPOTEK, J.; TURSKI, M.; FRĄC, M. Effects of application of recycled chicken manure and spent mushroom substrate on organic matter, acidity, and hydraulic properties of sandy soils. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 4036, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14144036>

LIU, H.; WANG, Y.; CAI, T.; HE, K.; TIAN, X.; CHEN, Z.; ... CUI, Z. Integrated management to achieve synergy in sugarcane production and quality in China. **Field Crops Research**, v. 317, p. 109552, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109552>

LIU, M.; HAN, G.; ZHANG, Q. Effects of agricultural abandonment on soil aggregation, soil organic carbon storage and stabilization: Results from observation in a small karst catchment, Southwest China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 288, p. 106719, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106719>

LOPES, I. M.; ASSUNÇÃO, S. A.; DE OLIVEIRA, A. P. P.; DOS ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E. Carbon fractions and soil fertility affected by tillage and sugarcane residue management of a Xanthic Udults. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 5, p. 2921-2932, 2017.

LORENZ, K.; LAL, R.; EHLERS, K. Soil organic carbon stock as an indicator for monitoring land and soil degradation in relation to United Nations' Sustainable Development Goals. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 7, p. 824-838, 2019. <https://doi.org/10.1002/ldr.3270>

LORIA, N.; LAL, R.; CHANDRA, R. Handheld In Situ Methods for Soil Organic Carbon Assessment. **Sustainability**, v. 16, n. 13, p. 5592, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16135592>

LU, X.; HOU, E.; GUO, J.; GILLIAM, F. S.; LI, J.; TANG, S.; KUANG, Y. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 27, n. 12, p. 2780-2792, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.15604>

LUZ, F. B.; CARVALHO, M. L.; AQUINO DE BORBA, D.; SCHIEBELBEIN, B. E.; PAIVA DE LIMA, R.; CHERUBIN, M. R. Linking soil water changes to soil physical quality in sugarcane expansion areas in Brazil. **Water**, v. 12, n. 11, p. 3156, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12113156>

MAJEED, A.; RASHID, I.; NIAZ, A.; DITTA, A.; SAMEEN, A.; AL-HUQAIL, A. A.; SIDDIQUI, M. H. Balanced use of Zn, Cu, Fe, and B improves the yield and sucrose contents of sugarcane juice cultivated in sandy clay loam soil. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 696, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030696>

MALVIYA, M. K.; SOLANKI, M. K.; LI, C. N.; WANG, Z.; ZENG, Y.; VERMA, K. K.; ... LI, Y. R. Sugarcane-legume intercropping can enrich the soil microbiome and plant growth.

Frontiers in Sustainable Food Systems, v. 5, p. 606595, 2021.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606595>

MARIN, F. R.; INMAN-BAMBER, G.; SILVA, T. G.; VIANNA, M. S.; NASSIF, D. S.; CARVALHO, K. S. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, p. 1349-1357, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03161-z>

MAURYA, S.; ABRAHAM, J. S.; SOMASUNDARAM, S.; TOTEJA, R.; GUPTA, R.; MAKHIJA, S. Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, p. 1-22, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08556-z>

MEDEIROS, A. D. S.; SILVA, T. S. D.; SILVA, A. V. L. D.; BARROS, D. R. S.; MAIA, S. M. F. Organic carbon, nitrogen and the stability of soil aggregates in areas converted from sugar cane to eucalyptus in the state of Alagoas. **Revista Arvore**, v. 42, n. 4, p. e420404, 2018. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400004>

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa, MG: UFV-Gefert, 2017.

MERLOTI, L. F.; BOSSOLANI, J. W.; MENDES, L. W.; ROCHA, G. S.; RODRIGUES, M.; ASSELTA, F. O.; ... TSAI, S. M. Investigating the effects of Brachiaria (Syn. Urochloa) varieties on soil properties and microbiome. **Plant and Soil**, p. 1-18, 2023.

<https://doi.org/10.1007/s11104-023-06225-x>

MORAES, L. A. A.; MELO, T. R.; TAVARES FILHO, J. Impact of Sugarcane Reform System in Sandy Soils on Organic Carbon and Soil Chemical Attributes. **Sugar Tech**, v. 25, n. 5, p. 1271-1274, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01268-x>

MORAES, L. A. D. A.; TAVARES FILHO, J.; MELO, T. R. D. Different managements in conventional sugarcane reform in sandy soils: effects on physical properties and soil organic carbon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. e0220017, 2022.

<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220017>

MORAIS, M. C.; SIQUEIRA-NETO, M.; GUERRA, H. P.; SATIRO, L. S.; SOLTANGHEISI, A.; CERRI, C. E.; ... CHERUBIN, M. R. Trade-offs between sugarcane straw removal and soil organic matter in Brazil. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9363, 2020.

<https://doi.org/10.3390/su12229363>

MUHANDIRAM, N. P.; HUMPHREYS, M. W.; FYCHAN, R.; DAVIES, J. W.; SANDERSON, R.; MARLEY, C. L. Do agricultural grasses bred for improved root systems provide resilience to machinery-derived soil compaction?. **Food and Energy Security**, v. 9, n. 3, p. e227, 2020. <https://doi.org/10.1002/fes3.227>

MUSTAFA, A.; MINGGANG, X.; SHAH, S. A. A.; ABRAR, M. M.; NAN, S.; BAOREN, W.; ... NÚÑEZ-DELGADO, A. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic

carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110894, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110894>

NATH, Arun Jyoti; LAL, Rattan. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA. **Pedosphere**, v. 27, n. 1, p. 172-176, 2017. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60301-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60301-1)

NIMMO, J. R.; PERKINGS, K. S. **Aggregate stability and size distribution**. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of American Book Series. v.5, p. 812-815, 2002.

NJARUI, D. M. G.; GATHERU, M.; GHIMIRE, S. R. Brachiaria grass for climate resilient and sustainable livestock production in Kenya. *African handbook of climate change adaptation*, p. 1-22, 2020.

OKOLO, C. C.; GEBRESAMUEL, G.; ZENEBE, A.; HAILE, M.; EZE, P. N. Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 297, p. 106924, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106924>

OLIVEIRA, S.; COSTA, K. A.; SEVERIANO, E.; DA SILVA, A.; DIAS, M.; OLIVEIRA, G.; COSTA, J. V. Performance of grain sorghum and forage of the genus Brachiaria in integrated agricultural production systems. **Agronomy**, v. 10, n. 11, p. 1714, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111714>

PIMENTEL, M. L.; DE OLIVEIRA, A. B.; SCHIEBELBEIN, B. E.; CARVALHO, M. L.; TENELLI, S.; CHERUBIN, M. R.; ... DE OLIVEIRA BORDONAL, R. Quantity, quality and physical protection of soil carbon associated with sugarcane straw removal in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 237, p. 105976, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105976>

PINTO, L. A. S. R.; DE SOUSA MORAIS, I.; OZÓRIO, J. M. B.; DE MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Soil aggregation and associated organic matter under management systems in sandy-textured soils, subtropical region of Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, p. 253, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10892-1>

POUDEL, A.; AYER, S.; JOSHI, R.; GAUTAM, J.; TIMILSINA, S.; KHADKA, K.; ... MAHARJAN, M. Effect of the irregular shelterwood system on soil organic carbon stock and soil quality of *Shorea robusta* Gaertn. f. forest in Nepal. **Heliyon**, v. 10, n. 15, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35441>

ROCCI, K. S.; LAVALLEE, J. M.; STEWART, C. E.; COTRUFO, M. F. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 793, p. 148569, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148569>

RONDON, T.; HERNANDEZ, R. M.; GUZMAN, M. Soil organic carbon, physical fractions of the macro-organic matter, and soil stability relationship in lacustrine soils under banana crop. **Plos one**, v. 16, n. 7, p. e0254121, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254121>

ROSOLEM, C. A.; LI, Y.; GARCIA, R. A. Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 4, p. 495-503, 2016. <https://doi.org/10.1111/sum.12309>

SAJID, M.; AMJID, M.; MUNIR, H.; AHMAD, M.; ZULFIQAR, U.; ALI, M. F.; ... ARTYSZAK, A. Comparative analysis of growth and physiological responses of sugarcane elite genotypes to water stress and sandy loam soils. **Plants**, v. 12, n. 15, p. 2759, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12152759>

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; DOS ANJOS, L.H.C.; DE OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. DE; ARRUDA 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, 356 p, 2018.

SCHJØNNING, P.; MCBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOUR, P. B. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83-87, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>

SEBEN, G. D. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Soil aggregation according to the dynamics of carbon and nitrogen in soil under different cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1652-1659, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900065>

SENA, K. N.; MALTONI, K. L.; TROLEIS, M. J. B.; FARIA, G. A. Forest harvest management systems and residual phytomass affecting physical properties of a sandy soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0200190, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20200190>

SHAHIDULLAH, S. M.; SHIRAZY, B. J.; SARKAR, M. A. R.; QUAIS, M. K. Four decades of research on rice intercropping: A bibliometric analysis. **Journal of Agriculture and Food Research**, p. 100964, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100964>

SILVA, R. L.; MATIAS, S. S. R.; LOBATO, M. G. R.; NÓBREGA, J. C. A. Atributos físicos do solo em diferentes coberturas vegetais na região sul do Piauí. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 160-168, 2014.

SILVA, A. M. S.; DE OLIVEIRA, E. C. A.; DE ANDRADE, J. J.; LIMA, A. M. S.; DE ALMEIDA, B. G.; TRIVELIN, P. C. O.; ... GUIMARÃES, D. H. The Leaching Potential and Recovery of 15-N-Fertilizer by Sugarcane Cultivated in Sandy Soil. **Sugar Tech**, v. 27, n. 1, p. 119-133, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12355-024-01479-w>

SILVA, B. O. T.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; LAL, R.; INAGAKI, T. M.; AMADO, T. J. C.; DE MORAES SÁ, J. C.; ... FRACETTO, F. J. C. Sixty Years of Sugarcane Monoculture Alters Carbon Preservation in Large Soil Macroaggregates in Tropical Soil. **Land Degradation & Development**, 2025. <https://doi.org/10.1002/ldr.5616>

SILVA, G. S. F.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. D.; CARDOSO, M. J.; ARAÚJO NETO, R. B. D. Soil water dynamics and yield in maize and *Brachiaria ruziziensis* intercropping. **Pesquisa**

Agropecuária Tropical, v. 50, p. e59809, 2020. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5059809>

SILVA, J. F. D.; GONTIJO NETO, M. M.; SILVA, G. F. D.; BORGHI, E.; CALONEGO, J. C. Soil organic matter and aggregate stability in soybean, maize and urochloa production systems in a very clayey soil of the Brazilian Savanna. **Agronomy**, v. 12, n. 7, p. 1652, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071652>

SILVA, W. K. M.; ABRAHAO, R.; JUNIOR, L. M. C. DINÂMICA E EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E OUTRAS CULTURAS AGRÍCOLAS NA PARAÍBA: UMA ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS GASES DE EFEITO ESTUFA. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 52, n. 2, p. 155-174, 2021. <https://doi.org/10.61673/ren.2021.1229>

SILVA, W. K. M.; DE FREITAS, G. P.; COELHO JUNIOR, L. M.; DE ALMEIDA PINTO, P. A. L.; ABRAHÃO, R. Effects of climate change on sugarcane production in the state of Paraíba (Brazil): a panel data approach (1990–2015). **Climatic Change**, v. 154, p. 195-209, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02424-7>

SINGH, S. R.; YADAV, P.; SINGH, D.; SHUKLA, S. K.; TRIPATHI, M. K.; BAHADUR, L.; ... KUMAR, S. Intercropping in sugarcane improves functional diversity, soil quality and crop productivity. **Sugar Tech**, v. 23, p. 794-810, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00955-x>

SIX, J.; GUGGENBERGER, G.; PAUSTIAN, K.; HAUMAIER, L.; ELLIOTT, E. T.; ZECH, W. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 4, p. 607-618, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00406.x>

SOARES, D. D. A.; MODESTO, V. C.; NAKAO, A. H.; SOARES, W. R.; FREITAS, L. A.; DICKMANN, L.; ... ANDREOTTI, M. Soybean Yield and Nutrition Grown on the Straw of Grain Sorghum Inoculated with *Azospirillum Brasilense* and Intercropped with BRS Paiaguás Grass. **Plants**, v. 12, n. 10, p. 2007, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12102007>

SOUSA, T. R.; DE CARVALHO, A. M.; RAMOS, M. L. G.; DE OLIVEIRA, A. D.; DE JESUS, D. R.; DA FONSECA, A. C. P.; ... MARCHÃO, R. L. Dynamics of Carbon and Soil Enzyme Activities under Arabica Coffee Intercropped with *Brachiaria decumbens* in the Brazilian Cerrado. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 835, 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13060835>

SOUZA, L. F. N.; CIAMPITTI, I. A.; FERNANDEZ, J. A.; FAVARIN, J. L.; DE OLIVEIRA, S. M. Maize-*Brachiaria* grass intercropping: a meta-analysis of major productivity drivers in Brazil. **Field Crops Research**, v. 306, p. 109205, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109205>

SOUZA, S. F. F.; DE ARAÚJO, M. D. S. B.; DA SILVA, M. S. L.; REIS, J. S. Estabilidade de agregados de solo em uma topossequência sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 7, p. 4066-4077, 2021.

SUZUKI, L. E. A. S.; PEDRON, F. D. A.; OLIVEIRA, R. B. D.; ROVEDDER, A. P. M. Challenges in the management of environmentally fragile sandy soils in Southern Brazil. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 9, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010009>

TANG, X.; HE, Y.; ZHANG, Z.; WU, H.; HE, L.; JIANG, J.; ... TANG, R. Beneficial shift of rhizosphere soil nutrients and metabolites under a sugarcane/peanut intercropping system. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1018727, 2022.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1018727>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573p.

TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CARVALHO, J. L. N. Multilocation changes in soil carbon stocks from sugarcane straw removal for bioenergy production in Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 7, p. 1099-1111, 2021.

<https://doi.org/10.1111/gcbb.12832>

THORBURN, P. J.; MEIER, E. A.; COLLINS, K.; ROBERTSON, F. A. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 99-111, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.009>

TISDALL, J. M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: Structure and organic matter storage in agricultural soils. **CRC Press**, p. 57-96, 2020.

TORINO, A. B.; DO NASCIMENTO, L. F.; DE BRITO, M. F.; LIMA, J. D. P.; GONÇALVES, W. G.; DE PINHO COSTA, K. A.; DA COSTA SEVERIANO, E. Agronomic performance of maize and 'Brachiaria' grasses cultivated at monocropping and intercropping in a compacted latossolo. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 9, p. 1533-1540, 2020.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. **DENSIDADE DE PARTÍCULAS**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Capítulo 8 Manual de Métodos de Análise de Solo. 3 ed. Revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573p.

VIANA, J. L.; DE SOUZA, J. L. M.; AULER, A. C.; DE OLIVEIRA, R. A.; ARAÚJO, R. M.; HOSHIDE, A. K.; ... DA SILVA, W. M. Water dynamics and hydraulic functions in sandy soils: Limitations to sugarcane cultivation in Southern Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 9, p. 7456, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15097456>

VIAUD, P.; HEUCLIN, B.; LETOURMY, P.; CHRISTINA, M.; VERSINI, A.; MANSUY, A.; ... NAUDIN, K. Sugarcane yield response to legume intercropped: A meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 295, p. 108882, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108882>

VICENTE, T. F. D. S.; PEDROSA, E. M.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; OLIVEIRA, A. K. S.; SOUZA, A. M. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1215-1222, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100010>

VIDAL, Maria de Fatima. AÇÚCAR: v. 8 n. 314 (2023). **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 8, 2024b. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2629>. Acesso em 18 de janeiro 2025.

WAKGARI, T.; KIBRET, K.; BEDADI, B.; TEMESGEN, M.; ERKOSSA, T. Effects of long term sugarcane production on soils physicochemical properties at Finchaa sugar Estate.

Journal of Soil Science and Environmental Management, v. 11, n. 1, p. 30-40, 2020.

<https://doi.org/10.5897/JSSEM2018.0710>

WANG, H.; PAN, Y. B.; WU, M.; LIU, J.; YANG, S.; WU, Q.; QUE, Y. Sugarcane genetics: Underlying theory and practical application. **The Crop Journal**, v. 13, p. 328-338, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.cj.2024.11.005>

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. D. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 487-494, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>

Agropecuária Brasileira, v. 40, p. 487-494, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>

Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 40, p. 487-494, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>

WENNECK, G. S.; SAATH, R.; DE ARAUJO, L. L.; PEREIRA, G. L.; DE OLIVEIRA, G. G. F.; DE OLIVEIRA SÁ, N.; DE SOUZA VOLPATO, C. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 8, n. 4, e6163, out./dez. 2021.

Revista de Agricultura Neotropical, Cassilândia-MS, v. 8, n. 4, e6163, out./dez. 2021.

Revista de Agricultura Neotropical, Cassilândia-MS, v. 8, n. 4, e6163, out./dez. 2021.

<https://doi.org/10.32404/rean.v8i4.6163>

WOOLIVER, Rachel; JAGADAMMA, Sindhu. Response of soil organic carbon fractions to cover cropping: A meta-analysis of agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 351, p. 108497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108497>

Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 351, p. 108497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108497>

Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 351, p. 108497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108497>

XIAO, L.; ZHANG, W.; HU, P.; XIAO, D.; YANG, R.; YE, Y.; WANG, K. The formation of large macroaggregates induces soil organic carbon sequestration in short-term cropland restoration in a typical karst area. **Science of The Total Environment**, v. 801, p. 149588, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149588>

Science of The Total Environment, v. 801, p. 149588, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149588>

Science of The Total Environment, v. 801, p. 149588, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149588>

YAO, Z.; KHAN, A.; XU, Y.; PAN, K.; ZHANG, M. Profiling of rhizosphere bacterial community associated with sugarcane and banana rotation system. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 11, n. 1, p. 91, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00616-7>

Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 11, n. 1, p. 91, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00616-7>

Chemical and Biological Technologies in Agriculture, v. 11, n. 1, p. 91, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00616-7>

<https://doi.org/10.1186/s40538-024-00616-7>

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. *Communications in soil Science and plant analysis*, London, v.19, p. 1467-1476, 1988.

Communications in soil Science and plant analysis, London, v.19, p. 1467-1476, 1988.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*, Madson, v.28, n.5, p. 337-358, 1936.

Journal of American Society of Agronomy, Madson, v.28, n.5, p. 337-358, 1936.

ZHANG, T.; LIU, Y.; GE, S.; PENG, P.; TANG, H.; WANG, J. Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen addition enhances residue-derived labile soil organic carbon and microbial network complexity in the soil during straw decomposition. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 23, n. 12, p. 4216-4236, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.02.020>

Journal of Integrative Agriculture, v. 23, n. 12, p. 4216-4236, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.02.020>

Journal of Integrative Agriculture, v. 23, n. 12, p. 4216-4236, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.02.020>

<https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.02.020>

ZHAO, X.; HAO, C.; ZHANG, R.; JIAO, N.; TIAN, J.; LAMBERS, H.; ... ZHANG, F. Intercropping increases soil macroaggregate carbon through root traits induced microbial

Intercropping increases soil macroaggregate carbon through root traits induced microbial

necromass accumulation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 185, p. 109146, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109146>

ZHENG, Y.; DOS SANTOS LUCIANO, A. C.; DONG, J.; YUAN, W. **Earth System Science Data Discussions**, v. 2021, p. 1-25, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-14-2065-2022>

ANEXO A – PRODUTIVIDADE E PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DA CANA-DE-AÇÚCAR NO PERÍODO DE EXPERIMENTO.

Peso da cana-de-açúcar obtida por tratamento analisado.

	Tratamento			
	D0	D10	D30	D50
Peso (kg)	14,08	15,02	18,22	13,25
	12,05	14,58	16,03	15,42
	16,07	17,79	14,1	14,2
	14,2	19,2	16,1	16,22
	13,28	15,34	14,25	15,15
	16,15	17,72	17,1	13,1
	15,3	16,34	15,3	14,2
	14,2	18,09	14,02	15,32
Soma	115,33	134,08	125,12	116,86

Produtividade obtida da cana-de-açúcar por tratamento.

Tratamentos	Descrição	TCH	ATR	TAH
D0	0 kg ha ⁻¹	64,07	118,13	7,57
D10	10 kg ha ⁻¹	74,48	128,99	9,61
D30	30 kg ha ⁻¹	69,50	132,67	9,22
D50	50 kg ha ⁻¹	64,92	125,39	8,14

TCH – tonelada de cana-de-açúcar por hectare. ATR – Açúcares totais recuperáveis (kg t⁻¹).
TAH – Toneladas de açúcar por hectare.

Parâmetros biométricos da cana-de-açúcar na área experimental.

Tratamentos	Descrição	Altura	Diâmetro	Largura
		(m)	(cm)	
D0	0 kg ha ⁻¹	1,8	2,0	4,0
D10	10 kg ha ⁻¹	1,9	2,2	4,3
D30	30 kg ha ⁻¹	1,8	1,9	4,3
D50	50 kg ha ⁻¹	1,9	2,0	4,3